ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE
FISICHE E NATURALI

Corso di Laurea in Fisica

SVILUPPO E VALUTAZIONE DI UN MODELLO PREVISIONALE PER IL CALCOLO DELL'INDUZIONE MAGNETICA GENERATA DA COMPONENTI ELETTRICI

Tesi di Laurea di:

FRANCESCA S. NOVELLI

Relatore: Chiar.mo

Prof. LUIGI BRUZZI

Correlatore:

Dott. STEFANO R. DE DONATO

I Sessione

Anno Accademico 2004-2005

A mia madre e mia nonna

"Non tutto ciò che può essere contato conta e non tutto ciò che conta può essere contato"

Albert Einstein

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare innanzi tutto il Prof. Luigi Bruzzi per avermi dato la possibilità di svolgere questo lavoro, per la disponibilità mostratami e per avermi incoraggiata durante il periodo della nostra collaborazione.

Ringrazio il Dr. Stefano R. De Donato, dell' Arpa di Rimini, per la cooperazione intrapresa nello svolgere il lavoro di questa tesi e per avermi seguito sempre con interesse.

Un ringraziamento al Dr. Paolo Bevitori, dell'Arpa di Rimini, per la disponibilità e per l'assistenza tecnica offertami.

Ringrazio la Dr.ssa Roberta Monti, dell'Arpa di Rimini, per avermi sostenuta in questo periodo, per aver messo a mia disposizione la propria competenza e professionalità, nonché per il rapporto amichevole che si è riusciti ad instaurare.

Ringrazio la Dr.ssa Simona Verità, del Dipartimento di Fisica dell' Università di Bologna, per la collaborazione ed assistenza nella conoscenza del software EFC 400 e per la pazienza infinita avuta.

Un particolare ringraziamento al Prof. Giordano Dominici per i consigli offerti, non solo didattici.

Ringrazio per la disponibilità il Prof. Nucci, del Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell' Università di Bologna.

Un ulteriore ringraziamento va all'Ing. Paolone della consulenza offertami in merito ai trasformatori.

Un riconoscimento inestimabile a mia madre, che mi ha supportato e sopportato non solo in questo frangente ma in ogni singolo istante della mia vita, che mi ha fatto da madre e da padre, che è stata la mia migliore amica e che ha creduto con tutte le sue forze, forse più di me, nel conseguimento della mia laurea.

Ringrazio mia nonna per tutto l'amore che mi ha donato e per tutto quello che mi ha insegnato.

Ringrazio tutti i parenti, zii e zie, cugine e cugine per essermi stati accanto, per avermi spronato, confortato in questi anni. In particolare

vorrei dire grazie a Cinzia per avermi insegnato con il suo esempio che non bisogna mai mollare la presa.
Sono grata all'infinita pazienza di Pasquale che ha saputo tenere i ritmi indiavolati del mio umore.
Ringrazio tutti gli amici, universitari e non, che con me hanno condiviso questa splendida esperienza, in particolare Letizia, Giada ed Ersilia.
Infine vorrei poter dire a mio nonno e a mio padre quanto sia incolmabile il vuoto che hanno lasciato nella mia vita, spero siano fieri di me.

INDICE

INTRODUZIONE

La crescita industriale di molti Paesi, tra cui l'Italia, ha portato negli ultimi decenni ad un inevitabile aumento dell'utilizzo di apparecchiature elettriche ed elettroniche. Ciò si traduce in un conseguente aumento dei livelli di campo elettromagnetico cui la popolazione è esposta in ambito sia lavorativo sia domestico.

Nel presente elaborato vengono presi in considerazione i campi elettromagnetici a bassa frequenza, in particolare i cosiddetti campi ELF (Extremely Low Frequency), che hanno come sorgenti le linee di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica e le cabine di trasformazione.

In tale panorama risulta di sempre maggiore interesse l'uso di modelli matematici in grado sia di evidenziare potenziali situazioni territoriali critiche in ambito ambientale e sanitario sia di analizzare diverse possibili soluzioni di mitigazione degli stessi valori di campo.

In questo senso, l'obiettivo del lavoro di tesi è stato principalmente quello di sviluppare ed applicare, in collaborazione con l'ARPA di Rimini, un modello di calcolo (MappeELF) per la stima dei livelli di induzione magnetica generata da linee elettriche aeree e cavi interrati. MappeELF è stato quindi messo a confronto con un modello commerciale già in uso (EFC400). L'interconfronto fra i modelli è stato eseguito attraverso l'esame di alcune configurazioni standard per le sorgenti. Una volta acquisita la capacità di utilizzare correttamente i due modelli si è proceduto alla verifica dell'accordo fra i valori sperimentali d'induzione magnetica rilevati sul campo e quelli stimati inserendo i dati delle configurazioni reali degli elettrodotti nei modelli di calcolo.

Lo stesso tipo di verifica fra valori stimati e misurati è stato effettuato anche per uno degli elementi costituenti una cabina di trasformazione MT/BT, mediante un primo tentativo di modellizzazione del trasformatore, al fine di valutare la possibilità di utilizzo del modello anche in situazioni di più complessa schematizzazione.

Schema di sviluppo della tesi:

Nel 1° capitolo sono richiamate le nozioni di base sui campi elettromagnetici.

Nel 2° capitolo sono descritte le caratteristiche dei sistemi di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica.

Nel 3° capitolo sono stati trattati gli aspetti biologici e gli effetti sulla salute umana dovuti all'esposizione ai campi elettromagnetici.

Nel 4° capitolo è esaminata la normativa nazionale, internazionale e regionale in merito all'elettrosmog.

Nel 5° capitolo sono discusse le varie tecniche di misura e la strumentazione atte alla misurazione di campi elettromagnetici.

Nel 6° capitolo viene descritto il modello MappeELF e comparato quest'ultimo con EFC400 mediante lo studio di diverse configurazioni delle linee elettriche.

Nel 7° capitolo sono rappresentati i dati ottenuti sperimentalmente ed i valori calcolati con l'uso dei modelli citati nel capitolo precedente.

1-IL CAMPO ELETTROMAGNETICO

1.1 La carica elettrica

La materia è costituita da atomi, che hanno dimensioni dell'ordine di grandezza di 10^{-10}m. Gli atomi sono a loro volta formati da particelle cariche elettricamente (protoni ed elettroni) e da particelle neutre (neutroni). I protoni ed i neutroni vengono anche detti nucleoni. La carica elettrica del protone e dell'elettrone hanno lo stesso valore, ma di segno opposto ed è circa $1.6*10^{-19}$ C, sarà negativa per l'elettrone e positiva per il protone. I nucleoni si legano fra loro in virtù della forza nucleare a formare il nucleo degli atomi. La carica del nucleo è positiva ed è dovuta al numero di protoni presenti nel medesimo (numero atomico). La massa del nucleo è circa uguale alla somma delle masse dei nucleoni che lo costituiscono. Il numero di nucleoni che formano il nucleo è detto numero di massa.

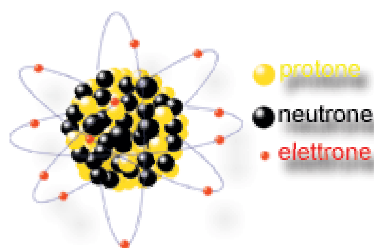


Figura 1.1 – Come è fatto un atomo

Intorno al nucleo, attratti da forze di tipo elettrico, orbitano gli elettroni, in numero pari al numero atomico del nucleo. L'atomo appare così, nel suo complesso, elettricamente neutro. Quando un atomo acquista uno o più elettroni o ne perde uno dei suoi, si trasforma in una particella dotata di carica elettrica chiamata ione, che sarà negativa nel primo caso e positiva nel secondo. Viene definita carica elettrica (q) la caratteristica di un corpo che determina l'intensità della forza di attrazione o repulsione da un altro corpo di analoghe caratteristiche, posto ad una determinata distanza. Le cariche possono essere sia negative che positive; cariche dello stesso segno si

respingono, mentre cariche di segno opposto si attraggono con una forza data dalla “Legge di Coulomb”:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Qq}{r^3} \cdot r \qquad (1.1.1)$$

ε_0 (detta costante dielettrica del vuoto) assume il valore

$$\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2} \qquad (1.1.2)$$

Nel sistema di unità di misura SI, l’unità di misura delle cariche è il *Coulomb C*, definito come quella *carica che attraversa in secondo un conduttore percorso dalla corrente di un Ampère (A).*

1.2 La corrente elettrica

Considerato un elemento di materiale conduttore internamente al quale si abbia un movimento ordinato di cariche, si definisce *corrente elettrica I* che passa nel conduttore

$$I = \frac{dQ}{dt} \qquad (1.2.1)$$

come il rapporto fra la carica dQ che fluisce nel tempo dt attraverso una sezione S del conduttore e l’intervallo di tempo dt. Nel sistema internazionale (SI) l’unità di misura delle correnti è l’Ampère (A), pari ad un Coulomb per secondo

$$1A = 1\frac{C}{s}$$

La corrente elettrica può essere costante nel tempo, in tal caso si parla di corrente stazionaria, oppure può essere variabile nel tempo con regolarità: corrente alternata.

Si verifica il passaggio di corrente elettrica quando le cariche elettriche sono sottoposte ad una forza che si esprime come *differenza di potenziale (ddp)* tra due punti di un materiale conduttore. L’unità di misura nel sistema SI della ddp è il Volt [V] (1V=1J/C).

Il passaggio di corrente elettrica, che non si riferisce soltanto a materiali conduttori, ma anche a gas ionizzati, semiconduttori, elettroliti, etc., implica lo spostamento nel tempo di cariche sulle quali è applicato un campo elettrico. Tale campo elettrico compie un lavoro

in modo tale da realizzare un trasferimento di potenza tra il campo stesso e la corrente. La potenza sviluppata dal campo elettrico (lavoro per unità di tempo) è:

$$W = \frac{dL}{dt} = I\Delta V \tag{1.2.2}$$

1.3 Il campo elettrico

Si definisce *campo elettrico (E)* la regione di spazio esterna intorno ad un oggetto dotato di carica elettrica, detto sorgente di campo, nella quale si manifestano forze di natura elettrica che vanno ad agire sui corpi elettrizzati posti all'interno del campo.

Considerata una carica elettrica, libera e priva di inerzia, immersa in un campo elettrico la traiettoria descritta da tale carica può essere visualizzata con la rappresentazione delle linee di forza

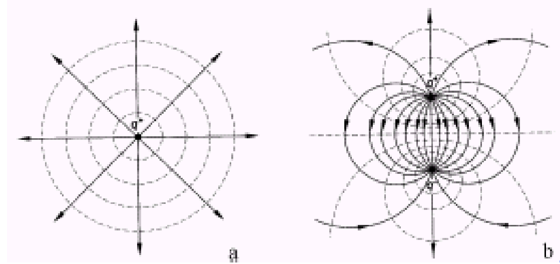


Figura 1.2 – Linee di forza del campo elettrico generate da: a) una carica q+ puntiforme, b) un dipolo (cariche uguali ma di segno opposto q+q-)

Data q carica qualunque puntiforme, posta nella posizione r =(x,y,z), il campo elettrico è dato da

$$E = \frac{F}{q} \tag{1.3.1}$$

L'unità di misura dell'intensità del campo elettrico nel sistema SI è il Volt per metro [V/m].

Nel caso di sorgente puntiforme Q fissa nello spazio vuoto, l'espressione del campo E deriva dalla legge di Coulomb. Supposta Q nell'origine

$$E_0(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^3}r \tag{1.3.2}$$

L'equazione appena vista può essere generalizzata al caso in cui la sorgente sia costituita da una distribuzione di *n* cariche puntiformi

(Q_i), disposte ciascuna nella posizione di raggio vettore (r_i) rispetto ad un sistema di riferimento fisso:

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{\left| r - r_i \right|^3} \cdot (r - r_i) \qquad (1.3.3)$$

Considerata una porzione elementare dS di una superficie S, $(dS = \hat{n} dS)$, con $\hat{n}$ versore normale all'elemento di superficie e dS area dell'elemento di superficie stesso.

Si definisce *flusso elementare* del vettore A attraverso l'elemento di superficie dS la quantità

$$d\Phi(A) = AdS = \vec{A}\hat{n}dS = AdS\cos\theta \qquad (1.3.4)$$

dove θ è l'angolo formato da $\hat{n}$ ed A.

Il *flusso* del vettore A attraverso l'intera superficie S sarà:

$$\Phi_s(\vec{A}) = \int_s d\Phi(\vec{A}) = \int_s \vec{A} \cdot dS \qquad (1.3.5)$$

L'enunciato del *teorema di Gauss* dice che:

il flusso del campo elettrostatico nel vuoto E_0 attraverso una superficie chiusa qualunque S è pari alla somma algebrica (nel caso di distribuzione continua di cariche, all'integrale) delle cariche contenute all'interno di S divisa per ε_0:

$$\Phi_s(\vec{E}_0) = \int_s \vec{E}_0 d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum Q_{\text{int}} \qquad (1.3.6)$$

Possiamo ora introdurre il *teorema della divergenza*, il quale stabilisce che: il flusso di un vettore (E) attraverso una superficie S è pari all'integrale della divergenza di E (divE) calcolato sul volume τ racchiuso da S. Da tale teorema si ricava la *prima equazione di Maxwell* (eq.1.3.7), che rappresenta sostanzialmente l'equivalente del teorema di Gauss

$$\vec{\nabla}\vec{E} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \rho(x, y, z) \qquad (1.3.7)$$

Considerando un conduttore all'interno del quale si hanno n portatori di carica liberi per unità di volume, ciascuno di carica q, considerate v_d le velocità di deriva diciamo che la densità di corrente, misurata in

A/m^2, è data da

$$\vec{J} = nq\vec{v}_d \qquad (1.3.8)$$

Il passaggio di corrente elettrica in regime stazionario in conduttori metallici è regolata dalla *Legge di Ohm*:

$$\Delta V = RI \qquad (1.3.9)$$

dove R è una costante di proporzionalità detta resistenza elettrica.

Per conduttori omogenei a sezione costante

$$R = \rho \frac{1}{S} = \frac{1}{\sigma}\frac{l}{S} \qquad (1.3.10)$$

Quest'equazione è anche detta *seconda legge empirica di Ohm,* l è la lunghezza valutata nella direzione della corrente ed S è la sezione, ρ è la resistività elettrica del materiale e σ=1/ρ è la conducibilità elettrica. In un mezzo conduttore *J=f(E)*, se siamo in presenza di mezzi conduttivamente lineari ed isotropi (ohmici) si ha:

$$J = \sigma E \qquad (1.3.11)$$

L'equazione precedente rappresenta la *Legge microscopica di Ohm.*

Le relazioni esposte tra campo elettrico, carica e corrente elettrica sono completate dalla Legge di conservazione della carica, la quale dice che in un sistema isolato la somma algebrica delle cariche elettriche si mantiene costante nel tempo. Questa legge insieme alle altre ci permette di riscrivere il tutto nella seguente forma

$$\int_A (\vec{J} \cdot \vec{n})dA = -\frac{d}{dt}\int_V \rho dV \qquad (1.3.12)$$

con ρ densità di carica distribuita nel volume V racchiuso nella superficie (ρ=dq/dτ, dτ elemento di volume).

1.4 IL campo magnetico

In regime statico, il campo magnetico viene definito come quella regione dello spazio che si estende attorno ad un corpo che è percorso da corrente elettrica, detto sorgente di campo magnetico, nella quale si verificano forze su altri oggetti attraversati da corrente elettrica. L'intensità del campo magnetico H si misura in A/m.

Il vettore di induzione magnetica B (densità di campo magnetico) indica la forza che in ogni punto della regione di spazio si verifica su una corrente elementare, che è posta in quel determinato punto.

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B} \qquad (1.4.1)$$

B è misurata in Tesla, la relazione fra B ed H è

$$B=H\mu_0 \qquad (1.4.2)$$

μ_0 è la permeabilità magnetica del vuoto, $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}$ Henry/m.

La legge fondamentale della magnetostatica è rappresentata dalla *legge di Biot e Savart,* la quale dice che fissato un sistema di riferimento inerziale, un circuito l' fermo in cui circoli corrente stazionaria I genera nello spazio vuoto circostante un campo di induzione magnetica B_0 che può essere calcolato come somma di contributi elementari dB_0 prodotti dai singoli elementi dl' del circuito, la cui espressione è

$$d\vec{B}_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{d\vec{l}\,' \times \Delta\vec{r}}{\left|\Delta\vec{r}^{\,3}\right|} \qquad (1.4.3)$$

dove Δr=r-r' è la differenza fra il vettore posizione r del punto P in cui si vuole calcolare il campo e il vettore posizione r' dell'elemento dl'.

Per circuiti filiformi il campo assume la forma:

$$d\vec{B}_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{l'} I \frac{d\vec{l}\,' \times \Delta\vec{r}}{\left|\Delta\vec{r}^{\,3}\right|} \qquad (1.4.4)$$

se invece si tratta di circuiti non filiformi allora il campo sarà dato da

$$\vec{B}_0(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{l'} \left[\int_{s} \left(\vec{J}(\vec{r}\,') \cdot d\vec{S}\,' \right) \cdot \frac{d\vec{l}\,' \times \Delta\vec{r}}{\left|\Delta\vec{r}^{\,3}\right|} \right] = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\tau'} \frac{\vec{J}(\vec{r}\,') \times \Delta\vec{r}}{\left|\Delta\vec{r}^{\,3}\right|} d\tau' \qquad (1.4.5)$$

dove $I = \int_{s'} \vec{J}(\vec{r}\,') \cdot dS'$,con S' sezione del conduttore, J(r') è la densità di corrente nella posizione r'.

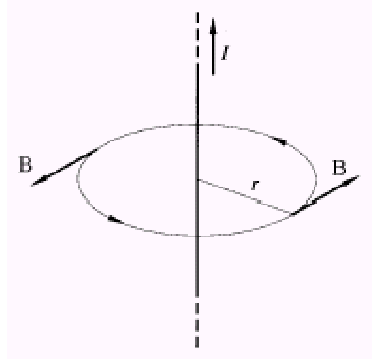


Figura 1.3 – Campo di induzione magnetica prodotto da un conduttore percorso da corrente I

A differenza del campo elettrostatico, il flusso di B attraverso una superficie chiusa è nullo, da questa osservazione discende la seconda equazione di Maxwell:

$$\vec{\nabla}\vec{B} = 0 \qquad (1.4.6)$$

la quale dice che il vettore B è solenoidale, ha cioè divergenza nulla; questo implica che le linee di forza del campo magnetico si richiudono sempre su se stesse o all'infinito (figura).

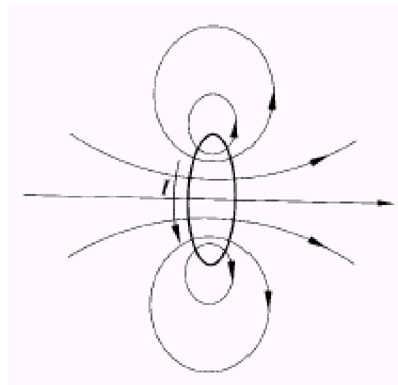


Figura 1.4 – Linee di forza del campo magnetico generate dalla corrente I

Una delle caratteristiche più importanti del campo magnetico variabile nel tempo, anche dal punto di vista dell'interazione con organismi biologici, consiste nella sua capacità di provocare correnti elettriche all'interno di oggetti conduttori dove, in assenza di campo, esse non erano presenti; questa proprietà è descritta matematicamente dalla *legge di Faraday-Neumann*: se un circuito è immerso in un campo di induzione magnetica il cui flusso Φ(B) concatenato col circuito stesso

sia variabile nel tempo, allora in esso si genera una forza elettromotrice indotta f_i data da:

$$f_i = -\frac{d\Phi(\vec{B})}{dt} \qquad (1.4.7)$$

Quindi un campo elettrico viene generato ogni qualvolta si sia in presenza di un campo di induzione magnetica B variabile nel tempo.

Essendo $\Phi(\vec{B}) = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$, dove S è una qualunque superficie che ha l come contorno

$$f_i = \oint \vec{E}_i \cdot d\vec{l} \qquad (1.4.8)$$

con $\vec{E}_i = \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}, \vec{v}$ può essere identificata con la velocità di trascinamento con cui si sta muovendo l'elemento dl di circuito

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} \qquad (1.4.9)$$

Possiamo calcolare il campo elettrico E indotto dal campo di induzione magnetica B, e dedurre altresì la densità di corrente indotta:

$$J=\sigma E \qquad (1.4.10)$$

1.5 Il campo elettromagnetico

Le cariche elettriche, la cui densità ρ rappresenta la sorgente del campo elettrico, quando sono in movimento danno luogo ad una densità di corrente J e diventano sorgente di un campo magnetico B.

Il fatto che le cariche siano ferme o si muovano è relativo, pertanto è relativo anche il fatto che si abbia a che fare con un campo elettrico o con un campo magnetico.

Quindi un campo elettrico variabile nel tempo genera un campo magnetico variabile nel tempo, in direzione perpendicolare ad esso, e a sua volta quest'ultimo produce un nuovo campo elettrico variabile.

La propagazione concatenata di questi campi produce il campo elettromagnetico.

Visivamente possiamo immaginarli come due onde perpendicolari fra loro, una magnetica ed una elettrica che viaggiano alla velocità della luce($c=2.98*10^8$ m/s),e che vengono chiamate onde elettromagnetiche.

Le onde elettromagnetiche trasportano energia e si propagano autogenerandosi anche quando la carica ha smesso di muoversi

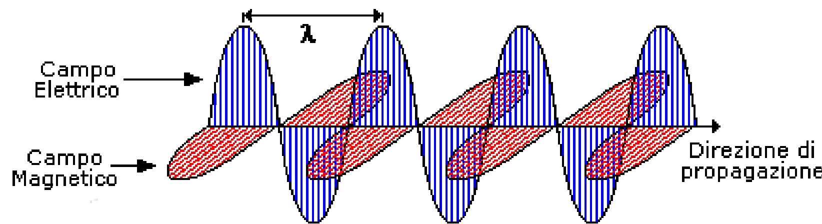


Figura 1.5 – Rappresentazione del campo elettromagnetico

La concatenazione dei due campi viene espressa matematicamente dalla terza e quarta equazione di Maxwell, nel vuoto e nel caso non stazionario

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (1.5.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{J} + \varepsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad (1.5.2)$$

Data la mutua generazione, i campi si propagano a distanza infinita dalla sorgente, assumendo una struttura di tipo radiativo. Tra i campi interagenti, quando variano in maniera sinusoidale, esiste una relazione che permette di determinare il valore dell'intensità dell'uno quando è nota l'intensità dell'altro:

$$\frac{E_{eff}}{B_{eff}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\Omega \qquad (1.5.3)$$

dove 377Ω è l'impedenza d'onda nel vuoto.

Il valore efficace è pari al valore quadratico medio delle intensità istantanee assunte in un periodo; indicando con B_0 l'intensità massima di induzione magnetica (ampiezza dell'onda) il valore efficace di B_{eff} vale:

$$B_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T B(t)^2 \cdot dt} = \frac{B_0}{\sqrt{2}} \qquad (1.5.4)$$

Nelle immediate vicinanze di una sorgente (antenna, elettrodotto, elettrodomestico, etc)e fino a circa un decimo di lunghezza d'onda (λ) di distanza da essa, campi elettrico e magnetico sono del tutto indipendenti l'uno dall'altro, devono in tal caso essere valutati

separatamente. Questa zona è detta zona dei *campi vicini,* che a sua volta si divide in altre due regioni: quella dei *campi reattivi* e quella di *Fresnel.*

La *regione dei campi reattivi* è quella che si trova nelle immediate vicinanze della sorgente e fino a una distanza pari ad un decimo della lunghezza d'onda. In questa regione i campi, anche se variabili, si comportano come campi statici, possiamo dire quindi che ci troviamo in regime quasi statico. In questa zona l'energia viene emessa e riassorbita dal generatore ogni quarto di periodo, quindi non vi è trasporto di potenza e le intensità dei campi elettrico e magnetico si attenuano rapidamente con la distanza dalla sorgente, assumendo significato solo in prossimità dell'emettitore.

Per valutare l'energia associata ad un punto bisogna misurare entrambi i campi presenti, quello elettrico e quello magnetico, valutati separatamente. Per misure di esposizione in questa zona la densità di potenza non è la grandezza appropriata da utilizzare.

La regione di campo vicino è, la più critica per quanto riguarda la protezione elettromagnetica, l'intensità dei campi si attenua in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente e in prossimità di questa si presentano valori più elevati di campo elettrico e di campo magnetico.

Nella regione dei campi reattivi le componenti della mutua generazione sono trascurabili rispetto a quelle dovute alle sorgenti fisiche, pertanto le equazioni di Maxwell assumono la seguente forma:

$$a)\, rot\vec{E} = 0$$

$$b)\, rot\vec{B} = \mu_0 \cdot J \qquad (1.5.5)$$

$$c)\, div\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$d)\, div\vec{B} = 0$$

La zona di Fresnel non è altro che una specie di zona d'intersezione fra i campi reattivi e quelli radiativi (lontani) e si trova ad una distanza dalla sorgente circa uguale alla lunghezza d'onda.

I campi lontani comprendono un'unica regione, quella dei campi radiativi, che si trova ad una distanza dalla sorgente maggiore di 1/10 della lunghezza d'onda. In questa zona la struttura dei campi comincia a risentire del fenomeno della radiazione, che, a distanze dalla sorgente maggiori del valore della lunghezza d'onda, resta l'unico significativo.

Questo fenomeno non è altro che la mutua generazione dei campi elettrico e magnetico variabili nel tempo, regolata dalle equazioni di Maxwell:

$$
\begin{aligned}
&a)\, div\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \\
&b)\, div\vec{B} = 0 \\
&c)\, rot\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (1.5.6) \\
&d)\, rot\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{J} + \mu_0 \cdot \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}
\end{aligned}
$$

dove nella quarta equazione il primo termine si annulla nel caso del vuoto essendo σ=0, ed il secondo termine rappresenta la corrente di spostamento.

Il campo lontano si attenua lentamente e la sua intensità è inversamente proporzionale alla distanza.

Come già detto un'onda elettromagnetica trasporta energia, la densità di potenza S per unità di superficie risulta proporzionale al prodotto delle intensità dei due campi e varia come $1/r^2$.

S è data dal modulo del vettore di Poynting: $\vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu}$ [W/m^2], ed è detta intensità dell'onda; essa rappresenta l'energia che all'istante t fluisce nell'unità di tempo attraverso la superficie unitaria disposta ortogonalmente al vettore velocità di propagazione:

$$S(\vec{r}, t) = E_{eff} \cdot B_{eff} = \frac{E_{eff}^2}{377} = 377 \cdot B_{eff}^2 \qquad (1.5.7)$$

come si può evincere è sufficiente conoscere una sola tra le grandezze S, E_{eff}, B_{eff}, per ricavare le altre due.

In conclusione possiamo riassumere dicendo che nelle regioni di campo lontano si assume il modello d'onda piana, che ha le seguenti caratteristiche:

- il fronte d'onda è piano
- E, H e la distanza di propagazione della luce K sono perpendicolari
- il rapporto E/H=Z è l'impedenza dell'onda, che nel vuoto è pari a 377 Ohms
- E ed H sono costanti in qualsiasi piano perpendicolare alla direzione di propagazione K
- l'energia trasportata dall'onda elettromagnetica è espressa in termini di energia che passa attraverso un'area fissata nell'unità di tempo e si può calcolare con il vettore di Poynting
- sia E che H variano come 1/r
- S varia come $1/r^2$

1.6 Lo spettro dei campi elettromagnetici

La natura della radiazione elettromagnetica varia a secondo della frequenza (f) d'oscillazione dei campi elettrico e magnetico.

Essenzialmente i campi elettromagnetici possono essere distinti in due classi principali: radiazioni ionizzanti e non ionizzanti, a seconda della capacità o meno dell'onda di provocare ionizzazione in un atomo o in una molecola:

- Le radiazioni ionizzanti sono tutte quelle forme di radiazione elettromagnetica che superano i 12 eV circa di energia (E) e che hanno quindi la proprietà di ionizzare atomi o molecole, ovvero romperne i legami interni.
- Le radiazioni non ionizzanti (NIR, non ionizing radiation) sono tutte quelle forme di radiazioni elettromagnetiche la cui energia (E) è talmente bassa, inferiore a 12 eV, che non sono in grado di ionizzare la materia.

$$E=h*f$$

Dove h è la costante di Planck e vale $4.13570*10^{-15}$ eVs, ed f è la frequenza (Hz=1/s).

Le radiazioni ionizzanti comprendono i raggi X e i raggi γ, ma anche i raggi cosmici, che pur non essendo onde elettromagnetiche, sono in grado di ionizzare la materia.

Le radiazioni non ionizzanti comprendono il vicino ultravioletto (UV), il visibile e l'infrarosso (IR), le microonde (EHF, SHF, UHF) e le radiofrequenze (RF), fino ad arrivare ai campi elettrico e magnetico a bassissime frequenze (ELF).

<table>
<tr><th colspan="2">Denominazione</th><th>Sigla</th><th>Frequenza (f)</th><th>Lunghezza d'onda (λ)</th></tr>
<tr><td colspan="2">Extremely Low Frequency</td><td>ELF</td><td>0 Hz – 3 kHz</td><td>>100 km</td></tr>
<tr><td colspan="2">Very Low Frequency (onde lunghissime)</td><td>VLF</td><td>3 – 30 kHz</td><td>100 – 10 km</td></tr>
<tr><td rowspan="4">RADIOFREQUENZE</td><td>Low Frequency (onde lunghe)</td><td>LF</td><td>30 –300 kHz</td><td>10 – 1km</td></tr>
<tr><td>Medium Frequency (onde medie)</td><td>MF</td><td>300 – 3000 kHz</td><td>1 km – 100 m</td></tr>
<tr><td>High Frequency (onde corte)</td><td>HF</td><td>3 –30 MHz</td><td>100 – 10 m</td></tr>
<tr><td>Very High Frequency (onde metriche)</td><td>VHF</td><td>30 – 300 MHz</td><td>10 – 1 m</td></tr>
<tr><td rowspan="3">MICROONDE</td><td>Ultra High Fequency (onde decimetriche)</td><td>UHF</td><td>300 –3000MHz</td><td>1000 – 100 mm</td></tr>
<tr><td>Super High Frequency (onde centimetriche)</td><td>SHF</td><td>3 – 30 GHz</td><td>100 – 10 mm</td></tr>
<tr><td>Extremly High Frequency (onde millimetriche)</td><td>EHF</td><td>30 – 300 GHz</td><td>10 – 1 mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">INFRAROSSO</td><td>IR</td><td>0.3 – 385 THz</td><td>1000 – 0.78 μm</td></tr>
<tr><td colspan="2">LUCE VISIBILE</td><td></td><td>385 – 750 THz</td><td>780 – 400 nm</td></tr>
<tr><td colspan="2">ULTRAVIOLETTO</td><td>UV</td><td>750 – 3000THz</td><td>400 – 100 nm</td></tr>
<tr><td colspan="2">RAGGI X</td><td></td><td>3 – 3000 PHz</td><td>100 – 0.1 nm</td></tr>
<tr><td colspan="2">RAGGI</td><td></td><td>Oltre 3 EHz</td><td>< 0.1 nm</td></tr>
</table>

Tabella 1.1 Classificazione delle onde em

1.7 Le sorgenti di campi elettromagnetici

Possiamo affermare che esistono due categorie di sorgenti di campi elettromagnetici, quelle naturali e quelle artificiali. Le prime sono quelle presenti in natura, mentre le seconde sono prodotte dall'uomo.

Analizziamo nel dettaglio:

Le sorgenti naturali possono essere classificate in quattro tipologie:

1. la radiazione solare, che quotidianamente incide sulla superficie terrestre, è costituita da onde elettromagnetiche ad ampio spettro di frequenza

2. il campo magnetico terrestre, che può essere considerato un campo quasi statico, avente delle piccole variazioni quotidiane, annuali e ogni undici anni; esso è prodotto da correnti elettriche che circolano negli strati profondi della terra
3. le correnti biologiche che sono presenti nei tessuti viventi, nei quali permettono lo svolgimento di tutte le funzioni fisiologiche
4. le scariche atmosferiche, sono fenomeni di natura elettrostatica e sono dovuti all'accumulo di altissime concentrazioni di cariche nelle nubi e conseguentemente elevatissime differenze di potenziale elettrico rispetto alla superficie terrestre. Quando tale differenza di potenziale (ddp) raggiunge livelli tanto elevati da rompere il dielettrico tra le nubi ed un punto della superficie terrestre si forma il fulmine. Durante la scarica si genera un improvviso ed intensissimo passaggio di cariche elettriche dal punto a potenziale elettrico più elevato (di solito la nube) al terreno, si forma cioè una corrente elettrica di intensità molto elevata. Il passaggio impulsivo di corrente elettrica genera la manifestazione di forti campi elettromagnetici in un ampio spettro di frequenze.

Le sorgenti artificiali possono essere classificate essenzialmente in tre tipologie:

1. le linee e gli impianti per la distribuzione dell'energia elettrica, che portano ad un incremento del campo elettrico e magnetico a bassa frequenza
2. gli impianti per le telecomunicazioni tv, radio e telefonia cellulare che hanno incrementato il livello ambientale di campo elettromagnetico nell'ambito delle radiofrequenze e delle microonde
3. l'uso di apparecchi elettrici, sia nelle case sia in ambito lavorativo, che porta ad un aumento dell'esposizione personale, dell'intero corpo o di qualche sua parte.

2-Sistemi di trasmissione, distribuzione ed utilizzo dell'energia elettrica

2.1 La potenza elettrica

Considerato un circuito su cui agisce una tensione sinusoidale v(t), con V tensione efficace, nel quale circoli una corrente i(t) di valore efficace I, che sia sfasata di φ rispetto alla tensione, vi sono tre diversi valori della potenza che vanno presi in esame:

- Potenza attiva o reale: $P=V\cdot I\cdot cos\varphi$ (2.1.1)

La potenza istantanea p(t) rappresenta il valore medio in un periodo della funzione periodica (non sinusoidale) ed è data da

$$p(t) = v(t)\cdot i(t) = V\cdot I\cdot \cos\varphi - V\cdot I\cdot \cos(2\varpi \cdot t+\varphi) \qquad (2.1.2)$$

Tale grandezza esprime la potenza che viene effettivamente assorbita e trasformata in calore per effetto Joule o in lavoro utile nelle macchine elettriche; la potenza attiva è sempre positiva indipendentemente dal segno di φ. L'unità di misura nel S.I. è il Watt (W).

- La potenza reattiva: $Q=V\cdot I\cdot sen\varphi$ (2.1.3)

riguarda l'energia che viene alternativamente assorbita e restituita dal campo magnetico, per circuiti induttivi, o dal campo elettrico, per circuiti capacitivi. Il suo valore medio in un periodo è nullo, non si ha trasformazione permanente di energia. Ciò porta a dire che un circuito puramente induttivo o capacitivo non è interessato da potenza attiva.

La sua unità di misura è il VAR (volt-ampère-reattivi) ed è dimensionalmente sempre il Watt.

La potenza reattiva può essere sia positiva che negativa, a seconda che il circuito sia capacitivo (φ>0) o induttivo (φ<0).

Se il circuito è *puramente induttivo o capacitivo* risulta senφ=1, viene quindi considerata come potenza reattiva la quantità $Q=V\cdot I$. Questa potenza reattiva non riveste il significato fisico di potenza, ma costituisce un riferimento ai valori efficaci di tensione e corrente, pertanto la sua unità di misura è il VAR.

- La potenza apparente: $A = V \cdot I$

è data dal prodotto dei valori efficaci di tensione e corrente e non dipende dall'angolo di sfasamento φ. Non ha un particolare significato, ma è importante perché legata al valore della corrente effettivamente in gioco nel circuito esaminato.

2.1.1 Il rifasamento

Viene detto rifasamento qualsiasi provvedimento atto a migliorare o aumentare il fattore di potenza cosφ di un dato carico in un dato punto della rete, tale da ridurre, a parità di potenza attiva trasportata, il valore della corrente che circola sulla rete.

Obbiettivo primario del rifasamento è la diminuzione delle perdite di energia e le potenze apparenti a cui proporzionare macchinari e linee. Rifasare significa diminuire l'angolo φ e quindi diminuire, fino eventualmente ad annullare, la potenza reattiva (Q) assorbita dal carico. A potenza reattiva nulla si ha cosφ=1 ed il rifasamento è totale. Per rifasare un impianto si usano i condensatori, il cui comportamento è opposto a quello dei componenti magnetici: i condensatori sono in grado di fornire sul posto l'energia reattiva richiesta. Tali elementi possono essere applicati alle singole macchine, specialmente in piccoli impianti, o possono essere installati in modo centralizzato.

2.2 I sistemi trifase

Considerato un generatore di corrente alternata possiamo considerarlo costituito schematicamente da tre avvolgimenti indotti, identici, disposti nello statore e spostati l'un l'altro di 1/3 di periodo (120°). A causa dell' uniforme rotazione di una ruota polare, in tali avvolgimenti vengono indotte tre tensioni sinusoidali identiche (v_a, v_b, v_c)che risultano sfasate di 120° l'una rispetto all'altra. Se poi questi avvolgimenti si chiudono su tre circuiti aventi la stessa impedenza Z, nei circuiti stessi si avranno tre correnti sinusoidali identiche (i_a, i_b, i_c). Tali correnti risultano sfasate di un angolo (-φ) rispetto alla corrispondente tensione (argomento di Z) e sono pertanto sfasate di

120° l’una dall’altra. Il sistema di queste tensioni e correnti costituisce il cosiddetto sistema trifase simmetrico ed equilibrato; la qualifica di simmetrico è riferita alla tensioni, quella di equilibrato è riferito alle correnti. La somma, in qualsiasi istante, dei valori istantanei delle correnti o delle tensioni in questo sistema, è nulla. Questo fatto permette la semplificazione a tre soli fili del circuito che occorre alla trasmissione di tale sistema di correnti. Infatti se i tre conduttori di ritorno delle correnti sono riuniti in unico filo, esso sarà percorso da una corrente nulla ($i_a+i_b+i_c=0$) e può essere soppresso. Nei sistemi elettrici di potenza sono ampiamente utilizzati i sistemi trifase. La ragione di ciò risiede nelle seguenti motivazioni:

- la potenza in forma elettrica è in massima parte gestita in regime alternato sinusoidale. Ciò in quanto in regime sinusoidale la generazione, la trasmissione, e buona parte dell’utilizzazione della potenza elettrica risultano molto efficienti
- la condizione che i tre conduttori siano percorsi da uguali valori efficaci di corrente e tra coppie di questi vi siano uguali tensioni in valore efficace, si realizza solo in sistemi trifase simmetrici ed equilibrati
- i generatori trifase sono meno ingombranti ed hanno un peso minore rispetto ad altri sistemi elettrici monofase ed in corrente continua
- a parità di parametri elettrici, le linee elettriche trifase hanno un peso minore rispetto alle altre.

Vengono dette potenza attiva, reattiva ed apparente di un sistema trifase le somme delle potenze attive, reattive ed apparenti delle singole fasi e sono rispettivamente:

$$\begin{aligned} &a) P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi \\ &b) Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot sen\varphi \\ &c) A = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \end{aligned} \tag{2.2.1}$$

Il valore istantaneo della potenza che passa attraverso una sezione di un sistema trifase è costante, mentre quella di un circuito monofase è

una grandezza periodica. La potenza istantanea di un sistema trifase è la somma delle potenze istantanee delle singole fasi:

$$p(t) = v_a(t) \cdot i_a(t) + v_b(t) \cdot i_b(t) + v_c(t) \cdot i_c(t) = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi \qquad (2.2.2)$$

2.3 Sistema di trasmissione e distribuzione

Solitamente le fonti di energia elettrica non risiedono vicino ai centri di consumo della stessa, quindi bisogna provvedere al suo trasporto trasmettendola a distanza e poi distribuirla ai singoli utenti per mezzo di linee elettriche. Una linea elettrica è formata da un determinato numero di conduttori all'interno dei quali passa la corrente, che solitamente è corrente alternata, ed il sistema è trifase. In Europa abbiamo una frequenza di 50 Hz mentre negli Stati Uniti si hanno 60 Hz.

Un sistema di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica è costituito da diversi elementi che verranno analizzati di seguito.

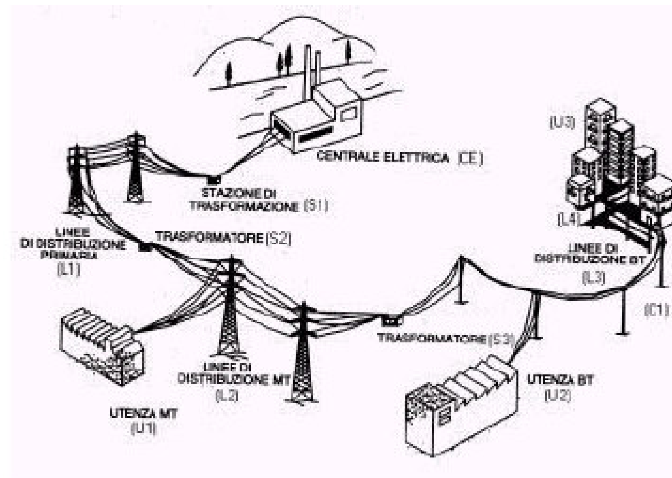


Figura 2.1 – Schema generale del sistema elettrico di potenza nazionale

2.3.1 Centrali elettriche

L'elettricità viene prodotta in apposite centrali, trasformando il potenziale energetico contenuto nelle fonti esistenti in natura. Una distinzione fondamentale riguardante le fonti energetiche primarie è quella tra fonti rinnovabili e fonti energetiche non rinnovabili. Si può dire che le fonti energetiche rinnovabili sono quelle disponibili in

modo diretto e continuo in natura, tali poter essere considerate virtualmente inesauribili. Tali possono essere considerate l'energia solare, l'energia eolica, l'energia termica, l'energia geotermica.
Viceversa le fonti energetiche non rinnovabili sono quelle che utilizzano, "consumandoli", combustibili accumulati sulla terra con una velocità di consumo maggiore di quella di produzione.
Tali sono da considerare i combustibili fossili (petrolio, carbone, gas naturale) e l'energia nucleare.
Una centrale elettrica è quindi un impianto che trasforma in energia elettrica altre forme di energia.
L'energia primaria, però, prima di divenire energia elettrica deve essere trasformata in energia cinetica di rotazione. Tale trasformazione intermedia è realizzata dalla turbina, ad essa è direttamente collegato l'alternatore che converte il moto rotatorio in energia elettrica.

2.3.2 Stazioni elettriche

Le stazioni elettriche hanno un ruolo fondamentale nell'ambito dei sistemi di trasmissione dell'energia elettrica. Esse possono essere classificate in:

- stazioni di trasformazione, quando eseguono variazione di tensione tra i sistemi elettrici a esse collegate
- stazioni di smistamento, quando ripartiscono l'energia elettrica tra i vari sistemi, tutti alla stessa tensione
- stazione di conversione, quando trasformano la forma d'onda della tensione, per esempio da alternata a continua
- stazioni di regolazione, in cui si effettua il rifasamento degli impianti per regolare la tensione e limitare le cadute di tensione in rete.

La funzione delle stazioni di trasformazione è quella di avere in ogni punto del sistema il valore più opportuno di tensione; S1 ed S2 indicano le stazioni primarie, S3 rappresenta la stazione secondaria. C1 è una cabina di trasformazione, la sua funzione è quella di

trasformare l’energia elettrica della media tensione di distribuzione alla bassa tensione di utilizzo. Le caratteristiche delle cabine elettriche verranno esaminate in dettaglio nei prossimi paragrafi.

2.3.3 Linee elettriche

Con la dicitura linea elettrica si indica un sistema elettrico che ha lo scopo di collegare tra loro due sezioni di una rete elettrica, trasferendo potenza dal punto di origine al punto di arrivo.
Le linee si dividono in funzione del tipo di conduttore utilizzato in:

- linee aeree, formate da conduttori non isolati posti in aria e fissati su sostegni di vario tipo.
- linee in cavo, che impiegano cavi elettrici con conduttori isolati, posti in vario modo.

Inoltre, in funzione della forma d’onda della corrente trasmessa, le linee si dividono ulteriormente in linee in corrente continua e linee in corrente alternata, le ultime suddivisibili in monofase e trifase.
Le linee in corrente continua e quelle monofase impiegano per la trasmissione due conduttori, mentre quelle trifase possono avere tre o quattro conduttori a seconda della presenza o meno del neutro.
In funzione della tensione di interfase di esercizio possiamo classificare le linee elettriche in:

- Distribuzione BT: V<1 kV
- Distribuzione MT: 1<V<40 kV
- Distribuzione AT: 40<V<150 kV
- Distribuzione AAT: V>150 kV

In riferimento alla figura 2.1, L1 rappresenta una linea di trasmissione dell’energia elettrica, ovvero il trasporto di una notevole quantità di energia a grandi distanze con elevati valori di tensione (380 – 220 kV), per mezzo di linee aeree o in cavo.
L2 rappresenta una linea di trasmissione secondaria o subtrasmissione, la tensione di esercizio in questo caso è compresa tra i 40 e 150 kV (quella di uso comune è di 132 kV). La distribuzione dell’energia si distingue in distribuzione in media tensione, indicata in figura 2.1

dalla linea L3, che in Italia è generalmente effettuata con tensioni di 15 e 20 kV, e una distribuzione in bassa tensione L4 (solitamente in cavo), nelle zone di elevata densità di utenza. Le diverse configurazioni delle reti variano a seconda dei livelli di tensione. Per le reti a media tensione (L3) è di tipo ad anello, ossia le linee e le cabine costituiscono un anello aperto o chiuso su se stesso in modo da far si che ciascuna cabina possa essere alimentata almeno da due parti. Le linee a bassa tensione (L4) possono essere radiali o magliate: nel primo caso la rete di ciascuna cabina è separata ed indipendente dalle altre e tra esse sono possibili solo collegamenti di emergenza, in caso di guasti. Nel secondo caso le cabine sono interconnesse tra loro, avendo così il vantaggio di un maggiore continuità e sicurezza di alimentazione e di una migliore distribuzione dei carichi fra le diverse cabine.

Un'ulteriore classificazione per le linee aeree è stabilita dalla norma CEI 11 – 4, resa legge dal decreto D.M.L.P. 21 Marzo 1988 n.449:

1. linee di classe zero: sono linee telefoniche, telegrafiche, per segnalazione e comando a distanza in servizio di impianti elettrici, che abbiano tutti o almeno una parte dei loro sostegni in comune con linee elettriche di trasporto o di distribuzione e che, pur non avendo alcun sostegno in comune, siano state dichiarate appartenenti a questa categoria in sede di autorizzazione;
2. linee di prima classe: sono linee di trasporto e distribuzione di energia elettrica con tensioni nominali di 1000 V, e linee in cavo per illuminazione pubblica con tensione nominale di 5000 V;
3. linee di seconda classe: sono le linee di trasporto e distribuzione di energia elettrica la cui tensione nominale è superiore a 1000 V, ma inferiore o uguale a 30 kV;
4. linee di terza classe: sono le linee di trasporto e distribuzione di energia elettrica con tensione nominale superiore a 30 kV e con carico di rottura $\geq$ 34340 N

2.3.4 Utenze

L'utilizzazione dell'energia elettrica non è altro che la trasformazione di tale energia in un'altra forma adatta alle utilizzazioni civili ed industriali. La tensione che viene prelevata alla presa di corrente della rete domestica ha un valore nominale di 220 V ed una frequenza di 50 Hz, nel Nord America questi valori sono rispettivamente 120 V e 60 Hz. La tensione trifase è 380 V (mentre tra fase e neutro si hanno 220 V), questa tensione viene utilizzata per il funzionamento di dispositivi elettrici che normalmente non si trovano all'interno di un ambiente domestico.

Nei vari appartamenti arriva invece una linea monofase, formata da un conduttore in tensione e un neutro, allacciata al contatore dell'appartamento. L'altro filo (detto di terra) che si inserisce tra il conduttore ed il neutro è il conduttore di protezione collegato all'impianto di terra: il suo scopo è quello di scaricare eventuali correnti al dispersore di terra in modo tale che, collegandovi alle intelaiature degli elettrodomestici, si è sicuri che non siano mai in tensione.

2.3.5 Apparecchi elettrici

Gli apparecchi che funzionano a corrente elettrica sono distinti in due categorie:

- fissi: sono quelli che funzionano di continuo anche se non sono direttamente utilizzati da una persona, essi producono un'esposizione a campi elettrici e magnetici di tipo continuo che può essere eliminata allontanandosi di qualche decina di centimetri dall'apparecchio stesso;
- mobili: sono quelli che funzionano solo nel momento in cui sono utilizzati direttamente da una persona; in questi casi l'esposizione è diretta ad una sola parte del corpo ed ha una breve durata.

Il campo elettrico prodotto da questi apparecchi è a bassissima frequenza ed è presente sia quando l'apparecchio è in funzione sia

quando non lo è, in questo caso il campo elettrico è prodotto dai conduttori inseriti nella presa di corrente.
Il campo magnetico, al contrario di quello elettrico, viene prodotto solo nel momento in cui l'elettrodomestico è in funzione e quindi al suo interno si ha circolazione di corrente elettrica.
Nella tabella 2.1 sino riportati i valori del campo elettrico e dell'induzione magnetica prodotti da alcuni elettrodomestici, che vengono comunemente utilizzati nella vita di tutti i giorni.

Elettrodomestici	Campo elettrico a 30 cm elettrodomestico [V/m]	Induzione magnetica vicino elettrodomestico [μT]	Induzione magnetica 30cm elettrodomestico [μT]	Esposizione
Trapano	-	800	16	Minuti
Apriscatole elettrico	-	2000	30	Secondi
Forno elettrico	4	1000	20	Alcune ore
Rasoio elettrico	100 (a 1 cm)	1500 (a 1 cm)	9	Minuti
Asciugacapelli	80	2500	7	Minuti
Illuminazione alogena	-	12	12 (a 50 cm)	Ore
Coperta elettrica	4500 (a 1 cm)	30 (a 1 cm)	-	Ore
Ventilatori	-	180	40	Alcune ore
Sega circolare	-	1000	25	Minuti
Lampada da 325W	-	2500	-	Minuti
Saldatrice/Aspirapolvere	90	800	20	Minuti
Casco asciugacapelli	-	2500	-	Minuti
TV a colori	90	500	4	Ore
Riscaldamento elettrico a Pavimento	-	20	12	Molte ore
Frullatore	100	700	10	Minuti
Lampada a incandescenza	-	400	4	Ore
Hi-Fi/Radiosveglia	180	5	5 (a 20 cm)	Molte ore
Monitor computer	-	0.25	0.25	Alcune ore
Ferro da stiro	120	30	0.4	Alcune ore
Macchina del caffè	30	2.5	0.15	Minuti
Frigorifero	110	1.7	0.3	Alcune ore
Tostapane	40	18	0.7	Minuti

Tabella 2.1 – Campo elettrico ed Induzione magnetica prodotto da vari tipi di elettrodomestici

il simbolo (-) indica un valore di campo elettrico/induzione magnetica confrontabile con il fondo elettromagnetico; sono riportati solo i valori massimi.

2.4 Rete elettrica italiana di trasmissione

La rete elettrica di trasmissione nazionale costituisce l'ossatura principale del sistema di trasporto dell'energia elettrica, si interconnette con le reti elettriche dei Paesi confinanti quali: Francia,

Svizzera, Austria, Slovenia e mediante cavo ad olio fluido posato sul fondo del mare con la Grecia; queste interconnessioni permettono fra l’altro l’affidabilità del sistema elettrico del nostro Paese.

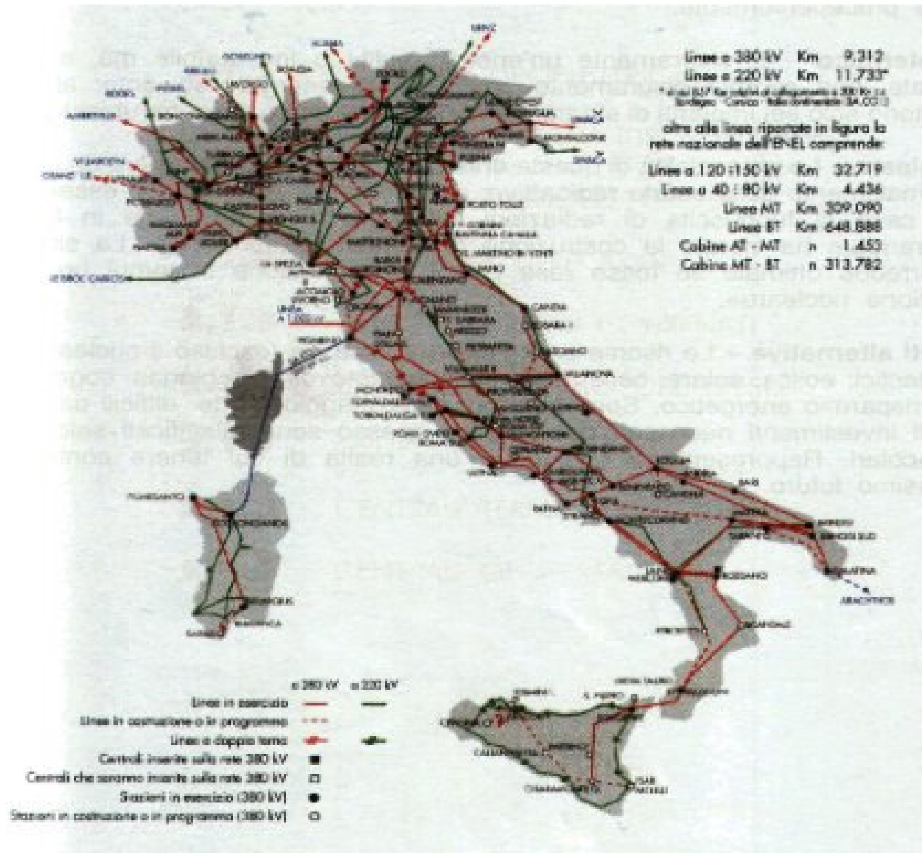


Figura 2.2 – Rete elettrica italiana a 380 220 kV (ENEL 2001)

Tramite la società Terna ed Enel Distribuzione, l’ENEL è proprietaria della maggior parte della rete di trasmissione nazionale e di gran parte delle reti di distribuzione. Negli ultimi trent’anni le linee elettriche di trasmissione (L1) dell’energia elettrica a 380 kV sono passate da 250 km ad oltre 9.000 km, mentre la rete di distribuzione (L3) da 300.000 a 900.000 km. Le Ferrovie dello Stato gestiscono inoltre una rete di circa 9.000 km di elettrodotti di cui 6.300 a tensione ≥ 132 kV. Le cabine primarie (C1) sono attualmente oltre 1.400, mentre quelle secondarie (C2) sono oltre 300.000. Inoltre sono presenti 83 stazioni di trasformazione (S1 e S2) a 380 kV e 116 stazioni di trasformazione a 220 kV.

In tabella 2.2 è riportata la lunghezza delle linee elettriche della rete dell'ENEL aggiornata al 2001, le superfici regionali sono ricavate dai dati ISTAT del 1998; i dati rappresentati in tabella sono suddivisi in relazione alle diverse tensioni e sono forniti con dettaglio regionale.

Regione	L < 40 kV [km]	L 40-150 kV [km]	L 220 kV [km]	L 380 kV [km]	L/S[16] < 40kV [km^{-1}]	L/S[11] 40-150 kV [km^{-1}]	L/S[11] 220 kV [km^{-1}]	L/S[11] 380 kV [km^{-1}]
Italia	1.040.087	37.460	10.153	9.761	345	12	3	3
Piemonte	81.733	3.237	1.059	799	322	13	4	3
Valle d'Aosta	4.049	235	239	128	124	7	7	4
Lombardia	103.128	4.685	792	1.274	432	20	3	5
Trentino Alto Adige	13.286	752	768	0	98	6	6	0
Veneto	81.180	3.360	903	603	441	18	5	3
Friuli Venezia Giulia	20.116	975	251	162	256	12	3	2
Liguria	20.262	833	398	192	484	15	7	4
Emilia Romagna	86.288	2.836	281	923	390	13	1	4
Toscana	78.523	2.674	680	1.070	341	12	3	5
Umbria	25.445	903	166	69	301	11	2	1
Marche	35.044	1.276	100	215	362	13	1	2
Lazio	60.936	1.918	383	1.332	354	11	2	8
Abruzzo	32.809	1.035	319	237	304	10	3	2
Molise	10.843	406	46	46	244	9	1	1
Campania	76.335	1.842	670	571	561	14	5	4
Puglia	82.028	2.257	125	1.003	424	12	1	5
Basilicata	23.070	969	140	189	231	10	1	2
Calabria	50.232	1.909	142	399	333	13	1	3
Sicilia	103.768	3.149	1.539	248	404	12	6	1
Sardegna	45.012	2.209	1.152	301	187	9	5	1

Tabella 2.2 – Lunghezza (L) delle linee elettriche dell'ENEL, diversificate per tensione per regione e normalizzate alla superficie (S) regionale (ENEL 2001 – ISTAT 1998)

La maggior parte della consistenza della rete elettrica italiana è costituita dalle linee a media e bassa tensione (tensione 40 kV), che rappresentano lo stadio finale del processo di produzione, trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica e che si presentano quindi con una densità nettamente maggiore sul territorio rispetto alle linee a tensione più elevata, mediamente i km di linee con tensione 40 kV rappresentano circa il 5% del totale.

2.5 Caratteristiche delle cabine elettriche

2.5.1 Cabine elettriche

Nell'ambito dei sistemi di distribuzione e trasformazione dell'energia elettrica le cabine elettriche rivestono un ruolo di fondamentale importanza, costituendo dei nodi della rete di distribuzione in cui si attua la trasformazione e lo smistamento dell'energia.

Per cabine di trasformazione s'intende il complesso di conduttori, apparecchiature e macchine atte a trasformare la tensione fornita dalle linee di distribuzione a media tensione (per esempio 20 kV) ai valori di alimentazione delle linee in bassa tensione (per esempio 220 380V).

La cabina di trasformazione costituisce quindi un sistema elettrico collegato ad una linea di media tensione (MT) e ad una linea di bassa tensione (BT).

Vi sono poi le cabine di smistamento che consentono di derivare da una o più linee di MT un maggior numero di linee ancora in MT, senza operare alcuna trasformazione.

In genere le cabine espletano entrambe le funzioni, di trasmissione e smistamento.

Un'ulteriore classificazione può essere effettuata distinguendo tra cabine pubbliche e cabine private:

- per cabine pubbliche s'intendono quelle cabine di proprietà dell'ente distributore dell'energia elettrica (ad esempio l'ENEL) che servono per l'alimentazione degli utenti in corrente alternata monofase a 220 V e trifase a 380 V. Normalmente impiegano un solo trasformatore, di potenza non molto elevata, e non sono dotate di strumenti di misura, in quanto non sono presidiate ed inoltre perché la misura dell'energia viene effettuata presso l'utente. Si distinguono in cabine rurali o urbane a seconda della loro ubicazione
- le cabine private sono di proprietà dell'utente e servono sia per l'alimentazione di utenze civili (ospedali, scuole, etc) che industriali, con fornitura dell'energia in MT. Nel caso delle cabine private occorre installare un gruppo di misura,

comprendente strumenti per la misurazione delle varie grandezze elettriche (tensione, frequenza, potenza, energia attiva e reattiva). L'istallazione del suddetto gruppo è di competenza della società elettrofornitrice.

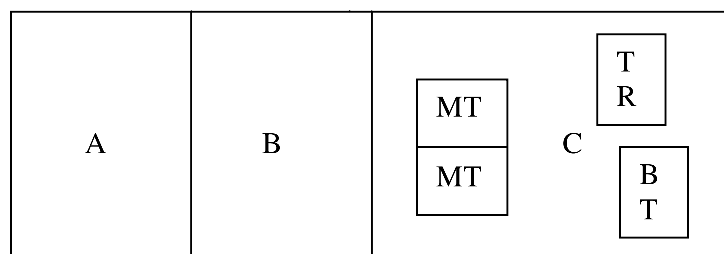


Figura 2.3 – Vista in pianta dei locali costituenti una cabina utente

A locale ente fornitore
B locale misure
C locale utente
TR trasformatore
MT apparecchiature di media tensione
BT quadro bassa tensione

Lato media tensione

Il lato media tensione di una cabina comprende i conduttori e le apparecchiature poste tra l'ingresso della linea MT ed il trasformatore. A seconda del tipo di cabina le soluzioni costruttive e circuitali adottabili sono diverse.

La figura 2.4 mostrata di seguito indica lo schema del lato MT di una cabina con un solo trasformatore, alimentata con una sola linea.

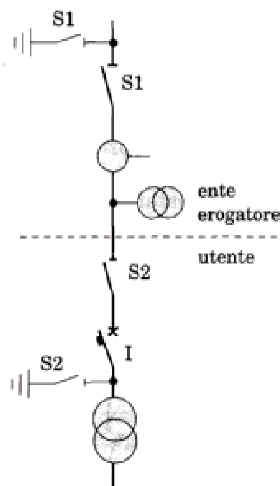


Figura 2.4 – Lato MT di una cabina

Il sezionatore S1 è munito do coltelli di terra interbloccati con quelli di linea, che servono a collegare la linea a monte in caso di lavori. L'apertura dei coltelli di linea determina automaticamente la chiusura di quelli di terra. Il sezionatore S2, munito anch'esso di coltelli di terra, e l'interruttore I servono per le manovre sul lato MT dell'utente; l'interruttore ha anche il compito di proteggere dalle sovracorrenti.

Componenti MT

♦ I conduttori

I conduttori dei circuiti MT sono solitamente di sezione circolare, in rame o in alluminio. Il diametro più usato è quello di 8 mm, anche se la sua sezione è spesso superiore a quella realmente necessaria. Viene, però scelto tale diametro per ottenere una buona resistenza meccanica relativamente alle sollecitazioni elettrodinamiche. La tabella seguente riporta le intensità di corrente ammissibili in tondi di rame elettrolitico e di alluminio con purezza 99,5%

INTENSITÀ DI CORRENTE (A)

Diametro (mm)	Rame	Alluminio
3	40	30
5	75	60
8	140	110
10	185	145
12	235	185
16	345	275
18	410	325
20	475	375
25	630	505

Tabella 2.3 – Intensità di corrente ammissibile

I conduttori sono nudi e montati rigidi, con terne distanziate di 1-2 mm; l'isolamento è ottenuto mediante un'adeguata distanza in aria, determinata in funzione della tensione massima di riferimento per l'isolamento.

♦ Apparecchi di manovra

Gli apparecchi di manovra sul lato MT sono scelti in base alla tensione di esercizio, alla corrente nominale e al potere di interruzione. Per quanto riguarda la tensione è necessario che il livello di isolamento dell'apparecchiatura sia corrispondente alla tensione massima di isolamento del sistema.

La corrente nominale va scelta in base alla corrente che circola nel dispositivo in condizioni nominali di esercizio. La corrente totale sul lato MT è data da:

$$I = \frac{A_n}{\sqrt{3}V_n} \qquad (2.5.1.1)$$

dove con A_n è indicata la potenza apparente e con V_n la tensione nominale.

Per la scelta del potere d'interruzione occorre riferirsi alla potenza di corto circuito della rete di alimentazione nel punto d'istallazione della cabina.

Detta A_{cc} tale potenza, indicata con I_{cc} la corrente di corto circuito e con V_m la tensione massima di isolamento, si ha

$$A_{cc} = \sqrt{3}V_m I_{cc} \Rightarrow I_{cc} = \frac{A_{cc}}{\sqrt{3}V_m} \qquad (2.5.1.2)$$

costruttivamente vengono utilizzati generalmente sezionatori a semplice interruzione. Esistono, comunque, per cabine poste in quadri prefabbricati, dei dispositivi di blocco che evitano le manovre errate.

♦ Fusibili

Quando la protezione del corto circuito è affidata ai fusibili vengono usate cartucce cilindriche montate su due isolatori. Nella tabella 2.4 sono riportate le caratteristiche dei fusibili MT reperibili in commercio.

Tensione di riferimento per l'isolamento (kV)	Corrente nominale (A)	Potere di interruzione simmetrico	
		(kA_{eff})	(MVA)
12	2-4-6,3-10-16-20-25-30-40	50	1000
	63-80	40	800
	100-125-160	31.5	600
17.5	2-4-6,3-10-16-20-25	31.5	1000
	30-40-63-80-100	25	800
24	2-4-6,3-10-16-20-25-30-40-63-80-100	25	1000
36	2-4-6,3-10-16-20-25-30-40	12.5	750

Tabella 2.4 – Caratteristiche dei fusibili MT

♦ Trasformatore

Il trasformatore costituisce la parte fondamentale di una cabina di trasformazione; la sua scelta condiziona in modo determinante la

configurazione della cabina. Per operare la scelta del numero e della potenza dei trasformatori da installare bisogna tener presenti alcune considerazioni:

1. costo per kVA dei trasformatori che diminuisce all'aumentare della potenza
2. aumentando il numero di trasformatori aumenta il numero di apparecchi di manovra, nonché il numero dei conduttori, con conseguente accrescimento della complessità dell'impianto, il che porta ad un incremento dei costi
3. per ottenere una migliore continuità di esercizio conviene suddividere la potenza su due unità anziché concentrarla su un unico trasformatore
4. se l'impianto funziona con un diagramma di carico che prevede una potenza minima per diverse ore giornaliere conviene installare un trasformatore di piccola potenza (10-15 kVA) per l'alimentazione dei servizi con funzionamento continuativo. In questo modo si evita di far funzionare il trasformatore principale a basso carico, che funzionerebbe con ridotti valori di rendimento.

Per potenze piccole, fino a 100-200 kVA, si installa un solo trasformatore, per potenze superiori a 1000-1600 kVA si suddivide la potenza su più unità.

Per la determinazione della potenza da installare bisogna valutare la potenza convenzionale mediante i fattori di utilizzazione e contemporaneità. Detto F fattore complessivo, ricaviamo la *potenza contrattuale* dalla seguente formula:

$$P_{cont} = F \sum_{i=1}^{n} P_i \qquad (2.5.1.3)$$

dove P_i indica la potenza di targa degli utilizzatori installati.

Per valutare la *potenza apparente di progetto* (eq. 2.5.1.4) si ipotizza un fattore di potenza cosφ=0.9, perché per sfasamenti maggiori conviene ipotizzare un impianto di rifasamento.

$$A_n = \frac{P_{cont} + P_{marg}}{0.9} \qquad (2.5.1.4)$$

dove P_{marg} indica il margine di potenza per future richieste.

Tipi costruttivi

Per quanto concerne il tipo di trasformatore la scelta è tra trasformatori in liquido isolante e trasformatori a secco.

Nel primo caso il trasformatore ha le parti attive (nucleo magnetico e avvolgimenti elettrici) poste internamente ad un cassone pieno di olio minerale, che funge da isolante e refrigerante. La temperatura di infiammabilità dell'olio usato nei trasformatori è circa 150°C. Nel normale funzionamento, a pieno carico, la temperatura dell'olio è di 90-100°C. Per consentire la variazione di volume del liquido isolante, a seguito di variazioni di temperatura, senza che l'involucro del trasformatore subisca anomale variazioni di pressione, viene generalmente utilizzato il seguente sistema: il trasformatore viene dotato di un conservatore d'olio, di forma cilindrica, posto sopra il cassone e comunicante con quest'ultimo e con l'atmosfera. Viene inoltre installato un filtro contenente una particolare sostanza (silica gel) che va sostituito prima che perda la sua efficacia. Tale filtro evita che l'umidità dell'aria penetri nel conservatore e faccia diminuire le qualità dielettriche dell'olio.

I trasformatori in olio per cabine elettriche vengono costruiti per tensioni fino a 36 kV e potenze fino a 3000 kVA.

I trasformatori a secco hanno il circuito magnetico e gli avvolgimenti non immersi in liquido isolante, cosicché il raffreddamento avviene tramite l'aria che lambisce le parti attive, con moto naturale (moti convettivi ascensionali) o forzato da ventole. I trasformatori a secco utilizzati in passato erano di tipo aperto. Attualmente vengono usati i trasformatori a secco inglobati in resina epossidica, le cui bobine, complete dell'isolamento fra le spire, sono poste in uno stampo in cui si effettua la colata a caldo sottovuoto della resina epossidica; in questo modo il trasformatore non presenta avvolgimenti isolati in vista, ma bobine cilindriche con superficie liscia, ottimamente protette da polvere, umidità e agenti inquinanti.

Modi di raffreddamento

Un'ulteriore scelta riguarda il tipo di raffreddamento che può essere in aria o in olio, ognuno contraddistinto da una sigla convenzionale:

- AN: raffreddamento in aria naturale (air natural)
- AF: raffreddamento in aria con circolazione forzata (air forced)
- ONAN: raffreddamento con circolazione naturale in olio all'interno del cassone e circolazione naturale di aria all'esterno (oil natural, air natural)
- ONAF: raffreddamento con circolazione naturale di olio e circolazione forzata di aria mediante ventole esterne (oil natural, air forced)
- OFAN: raffreddamento con circolazione forzata di olio, mediante pompe, e circolazione naturale di aria (oil forced, air natural)
- OFAF: raffreddamento con circolazione forzata sia dell'olio che dell'aria (oil forced, air forced)

Esistono anche dei raffreddamenti più energici, basati sull'uso di scambiatori di calore olio-acqua (OFWF), ma vengono usati per macchine di maggior potenza, installata in stazioni di trasformazione. Nell'ambito delle cabine si tende ad evitare l'uso di dispositivi per la circolazione forzata dei fluidi di raffreddamento; si possono usare trasformatori di tipo AN, altrimenti si installano trasformatori di tipo ONAN, se il locale è di tipo chiuso o non sufficientemente ventilato viene usato il raffreddamento ONAF.

Caratteristiche elettriche

Altre caratteristiche importanti dei trasformatori da cabina sono quelle di seguito illustrate:

- *Rapporto di trasformazione:* indica il rapporto tra la tensione nominale primaria e quella secondaria a vuoto. Nel caso più frequente di alimentazione di carichi a tensione nominale 380 V, si pone generalmente V_{20}=400 V. Il margine di 20 V serve a compensare la caduta di tensione interna del trasformatore a quella nei circuiti di bassa tensione. La tensione nominale primaria viene scelta in base a quella della linea di alimentazione

della cabina; generalmente la tensione che arriva in cabina è diversa dal valore nominale, a causa delle cadute di tensione di linea, pertanto servirà munire il trasformatore di un commutatore e di prese intermedie sul lato MT, mediante il quale si adegua il rapporto di trasformazione al valore effettivo della tensione primaria.

- *Collegamenti degli avvolgimenti:* vengono convenzionalmente indicati con delle lettere, maiuscole per il lato MT e minuscole per il lato BT.
  - D,d collegamento a triangolo
  - Y,y collegamento a stella
  - Z,z collegamento a zig-zag

  Per i trasformatori di cabina il collegamento più utilizzato è quello triangolo-stella con neutro (Dyn).

  Il collegamento triangolo sul primario tollera meglio i carichi squilibrati e la presenza di componenti armoniche dovute a forme d'onda non perfettamente sinusoidali, mentre il collegamento a stella sul secondario consente di avere due diversi valori di tensione, quello concatenato tra ogni coppia di fasi e quello tra ogni fase e neutro.
- *Gruppo CEI di collegamento:* è indicato convenzionalmente con un numero, che moltiplicato per 30, dà il valore in gradi dell'angolo di ritardo della tensione di fase lato BT rispetto a quella del lato MT. I valori previsti dalle norme CEI sono quattro: 0, 5, 6, 11 che indicano rispettivamente sfasamenti di 0°, 150°, 180°, 330°. Un collegamento di uso molto comune è il Dyn11.
- *Tensione di corto circuito percentuale:* è data dal rapporto percentuale

$$V_{cc}\% = \frac{V_{1cc}100}{V_{1n}} = \frac{V_{2cc}100}{V_{20}} \qquad (2.5.1.5)$$

dove V_{1cc} e V_{2cc} indicano le tensioni di alimentazione primaria e secondaria, che fanno circolare le correnti nominali durante il

funzionamento in corto circuito. Il valore della $V_{cc}\%$ è importante per la determinazione della corrente di corto circuito sul lato BT:

$$I_{cc} = \frac{100 I_n}{V_{cc}\%} \tag{2.5.1.6}$$

Per trasformatori di cabina si ha normalmente $V_{cc}\% = 4\text{-}6\%$

- *Perdite e rendimenti*: i trasformatori sono caratterizzati da perdite nel ferro, normalmente riferite alla tensione nominale, e perdite nel rame, normalmente riferite alla corrente nominale e alla temperatura convenzionale di 75° C o comunque a quella di servizio della macchina. Dal valore delle perdite dipende quello del rendimento.
- *Corrente a vuoto*: è la corrente assorbita a vuoto dal lato MT alimentata alla sua tensione nominale e riferita in percentuale al valore della corrente nominale. Per trasformatori di cabina il valore di $I_0\%$ varia generalmente dal 2,5% all'1%, diminuendo all'aumentare della potenza.
- *Tipo di servizio*: la sua scelta dipende dal diagramma di carico delle utenze alimentate, normalmente si adotta il servizio continuo S1.

Lato bassa tensione

La configurazione circuitale del lato BT di una cabina di trasformazione e smistamento dipende da vari fattori, tra cui:

- numero di trasformatori
- tipo di distribuzione BT (a tre o quattro fili)
- valori di correnti di corto circuito.

Si riportano di seguito gli schemi di alcuni casi tipici, rispetto ai quali è possibile apportare le variazioni richieste dal particolare problema in esame.

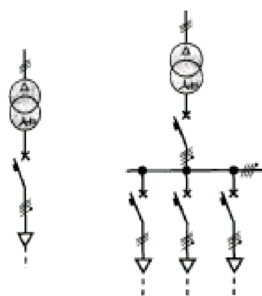
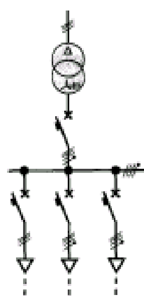
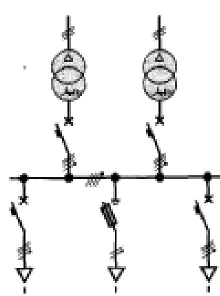
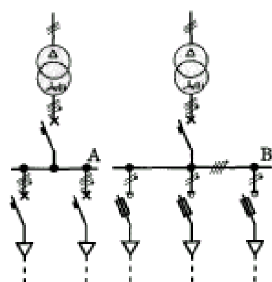




Fig. 2.4a Fig. 2.4b Fig. 2.4c



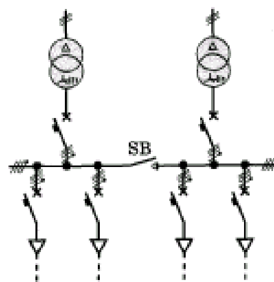


Fig. 2.4d Fig. 2.4e

Figg. 2.4a, b, c, d, e – schemi unifilari lato BT di cabine di trasformazione e smistamento
a) un trasformatore con una linea in partenza
b) un trasformatore con più linee in partenza
c) due trasformatori con più linee in partenza
d) due trasformatori con sbarre BT separate
e) sbarre sezionate con possibilità di parallelo dei trasformatori

Componenti del lato BT

♦ Conduttori

Il dimensionamento dei conduttori dei circuiti BT va fatto tenendo prevalentemente conto della corrente circolante, che è molto maggiore rispetto al lato MT e produce un notevole sviluppo di calore. Dato che le lunghezze delle condutture sono piuttosto limitate, non vi sono in genere problemi di elevate cadute di tensione, ma piuttosto di surriscaldamento dei conduttori stessi. Il materiale usato è rame o alluminio in sbarre di sezione rettangolare, nude, fissate in portasbarre. Nel caso di correnti molto intense si possono usare in parallelo per fase, distanziate in modo da favorire il raffreddamento. Vengono anche usati cavi, generalmente unipolari, isolati in PVC, EPR o XLPE, disposti su passerelle, eventualmente con più cavi in parallelo per fase nel caso di elevate intensità di corrente. L'eventuale neutro ha sezione pari alla metà di quella delle fasi. Il calcolo della sezione delle sbarre va impostato con il criterio della massima

sovratemperatura ammissibile, con valori tipici di 40° C per la temperatura ambiente e di 30° C per la sovratemperatura ammissibile.

♦ Apparecchi di manovra

Gli apparecchi usati sono in aria e vengono installati in quadri metallici di vario tipo. A seconda dei casi si utilizzano:

- interruttori automatici con protezione magnetotermica o elettronica di massima corrente
- interruttori di manovra con fusibili.

♦ Apparecchi di misura

La strumentazione BT è limitata, nella maggior parte dei casi, all'uso di voltmetri e amperometri. Per gli strumenti voltmetrici si usa l'inserzione diretta, dato che il valore della tensione BT è compatibile con la loro portata, mentre le bobine amperometriche sono alimentate in modo indiretto mediante TA.

Protezioni e loro scelta

In una cabina elettrica devono essere previsti diversi sistemi di protezione; in linea di massima si devono prevedere:

- protezione dalle sovratensioni
- protezione dai sovraccarichi
- protezione dai corti circuiti
- protezione dai guasti interni del trasformatore
- protezione antincendio
- protezione dalle tensioni di contatto

Vediamo nel dettaglio le singole caratteristiche di ciascuna di esse:

Protezione dalle sovratensioni:

le macchine e le apparecchiature presenti nelle cabine possono essere interessate da sovratensioni, ossia dall'anormale innalzamento della tensione verso terra e/o tra le fasi, rispetto al valore normale di funzionamento. La protezione viene effettuata mediante il coordinamento dell'isolamento e utilizzando gli scaricatori di sovratensione, montanti sul lato MT per cabine soggette a fulminazioni perché connesse a linee aeree, linee che fungono da guida d'onda per tali sovratensioni. L'installazione degli scaricatori

deve avvenire il più possibile vicino alle apparecchiature da proteggere; di norma se ne installa anche uno all'ingresso della cabina, eventualmente comandato da un sezionatore normalmente chiuso.

Protezione dai sovraccarichi:

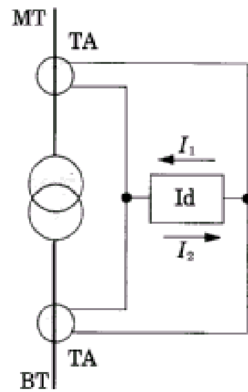
nel caso di cabine il sovraccarico si sviluppa sul lato BT, dal quale vengono alimentati i carichi, e pertanto i dispositivi di protezione interverranno solo sugli apparecchi di manovra posti su questo lato. Il montante del trasformatore verrà protetto da relè termico agente sull'interruttore automatico lato BT, mentre le derivazioni andranno protette con relè termici agenti sui rispettivi interruttori automatici o con fusibili, a seconda della soluzione scelta.

Protezione dai corto circuiti:

in questo caso la protezione riguarda sia il lato MT che quello BT. Sul lato MT possono essere utilizzati sganciatori magnetici agenti sull'interruttore automatico MT o mediante fusibili MT accoppiati all'interruttore di manovra-sezionatore. Sul lato BT la protezione è affidata a relè magnetici o elettronici agenti sull'interruttore automatico BT. Per le derivazioni si usano ancora interruttori con sganciatore magnetico o fusibili.

Protezione dai guasti interni del trasformatore:

i guasti interni del trasformatore (corto circuito tra spire, corto circuito verso massa, ecc...) provocano il surriscaldamento della macchina, facendo aumentare la temperatura delle sue parti oltre i limiti ammessi. Nel caso di trasformatori ad olio si controlla la temperatura del liquido mediante un termometro a contatti, che provoca una segnalazione o un blocco nel caso di aumento anormale della temperatura. Una protezione molto diffusa è l'uso di <u>relè Buchholz</u> a sviluppo di gas, impiegabile solo per trasformatori in olio con conservatore e montato sul tubo che collega il cassone al conservatore dell'olio. Nel caso di trasformatori di maggior potenza (1000-2000 kVA e oltre) è opportuno installare anche una protezione differenziale a squilibrio di corrente (schemi 2.5)



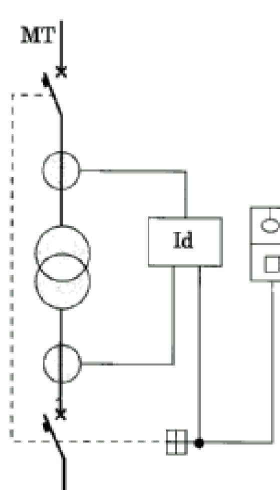


Fig. 2.5a Fig. 2.5b

Fig 2.5 a) schema di principio dell'inserzione di uno sganciatore differenziale
b) indicazione della protezione combinata differenziale più Buchholz

L'elemento sensibile del relè agisce in funzione di una corrente differenziale, proporzionale alla differenza tra le correnti dei lati MT e BT. Il relè interviene solo quando, a causa di una dispersione di corrente per guasto interno, il rapporto tra le due correnti diventa diverso da quello effettivo della macchina; in tal caso la corrente differenziale diventa diversa da zero e, superato il valore di taratura, il relè provvede a comandare il distacco della macchina dalla rete.

Protezione antincendio:

innanzi tutto si applica una protezione preventiva, ovvero la progettazione e la costruzione della cabina devono seguire criteri tali da rendere minima la possibilità che si inneschi un incendio. Tra le misure repressive, che intervengono cioè ad incendio avvenuto, una è rappresentata dal pozzetto di raccolta dell'olio. Altre protezioni sono costituite da estintori, di numero e capacità dipendenti dalle dimensioni della cabina.

Protezioni dalle tensioni di contatto:

riguarda essenzialmente l'impianto di terra, che deve essere dimensionato con determinati requisiti che analizzeremo di seguito.

Impianto di terra

Progetto, esecuzione e verifica dell'impianto di terra delle cabine elettriche deve rispondere alle prescrizioni della norma CEI 11-1/1999, che si applica agli impianti elettrici in corrente alternata con

tensione nominale superiore a 1000 V. Le grandezze elettriche definite dalla norma suddetta sono riportate di seguito:

- Corrente di guasto a terra I_F e corrente di terra I_E: la corrente di guasto a terra I_F è la massima corrente che fluisce verso terra, in occasione di un guasto monofase a terra sul sistema a tensione superiore a 1000 V (lato MT delle cabine). La corrente di terra I_E è, invece, la quota parte della corrente di guasto I_F che l'impianto di terra disperde nel terreno.
- Tensione e resistenza di terra: per tensione totale di terra U_E si intende la tensione che si stabilisce tra l'impianto di terra e i punti del terreno sufficientemente lontani che si assumono a potenziale zero, in occasione della dispersione della corrente di terra. Il rapporto $\mathbf{R_E = U_E/I_E}$ definisce la resistenza di terra.
- Tensione di contatto e di passo: la tensione di contatto U_T è definita convenzionalmente per il contatto mani-piedi, con la mano a contatto con la massa in esame e i piedi alla distanza di 1m dalla proiezione verticale del punto considerato. La tensione di passo U_S è quella che si stabilisce tra i piedi di una persona, posti convenzionalmente a 1m di distanza fra loro, in occasione di un guasto a terra ed è dovuta al diverso valore del potenziale assunto dai vari punti del terreno. La tensione di contatto a vuoto U_{ST} e la tensione di passo a vuoto U_{SS} rappresentano le differenze di potenziale che si localizzano, rispettivamente, tra massa e punti del terreno a distanza di 1m, e tra punti diversi del terreno distanti tra loro 1m, in occasione di un guasto a terra ma in assenza del corpo umano. Questi valori vengono calcolati in sede di progetto. I valori di contatto ammissibile U_{TP} sono stabiliti dalla normativa. La norma CEI 11-1 definisce anche i valori della tensione di passo ammissibile (U_{SP}), prendendo come riferimento quelli di U_{TP}.
- Impianto di terra globale: la norma CEI 11-1 ha introdotto il concetto di *impianto di terra globale,* applicabile alle reti di trasmissione e di distribuzione pubbliche. Per impianto di terra

globale si intende un impianto di terra realizzato con l'interconnessione di più impianti di terra che assicura, data la vicinanza degli impianti stessi, l'assenza di tensioni di contatto pericolose. Quest'impianto permette la ripartizione della corrente di terra in modo da ridurre l'aumento del potenziale di terra negli impianti di terra singoli. Si può dire che tale impianto forma una superficie quasi equipotenziale.

- Dimensionamento dell'impianto di terra: nel caso di un impianto utilizzatore, alimentato con una cabina propria, l'impianto di terra è generalmente unico per la media e bassa tensione. Le soluzioni costruttive per realizzare l'impianto di terra di una cabina sono molteplici e dipendono dal valore della resistenza di terra che si deve ottenere, dalla resistività del terreno, dall'ubicazione della cabina.

2.6 Caratteristiche delle linee elettriche

2.6.1 Linee elettriche aeree

Le linee aeree sono costituite da fasci di conduttori nudi sostenuti tramite isolatori da appositi sostegni verticali, detti mensole, in modo da formare delle campate che assumono il caratteristico andamento a catenaria. Con il nome di catenaria si indica il luogo dei punti lungo cui si dispone una fune pesante, omogenea, inestensibile e perfettamente flessibile, sospesa per i suoi estremi, soggetta unicamente al proprio peso; queste condizioni sono soddisfatte, con grande approssimazione, dai conduttori delle linee elettriche aeree, per i quali la condizione di flessibilità è assicurata dalla grande lunghezza di cavi in relazione al loro diametro. L'espressione generale per la curva cercata è la seguente:

$$z(\xi) = k \cosh\left(\frac{\xi}{k} + C_1\right) + C_2 \qquad (2.6.1.1)$$

Le due costanti arbitrarie di integrazione C_1 e C_2 devono essere determinate in base alle coordinate dei punti iniziali e finali della campata. In altre parole, assegnati due punti nello spazio e un valore

per il parametro di tesatura k, esiste una ed una sola catenaria che passa per i punti dati ed ha quel valore del parametro di posa.

I conduttori attivi, cioè sotto tensione e percorsi da corrente, sono di norma organizzati in gruppi di tre, a costituire delle terne trifase in cui la differenza di potenziale nei tre conduttori risulta di ampiezza pari alla tensione nominale di esercizio, ma sfasati di 120° l'uno dall'altro. Gli elettrodotti possono essere a terna semplice o a doppia terna.

Conduttori per linee aeree: i conduttori attivi hanno il compito di consentire il passaggio della corrente elettrica lungo la linea, con il minimo dispendio di energia. Un buon conduttore deve possedere alcuni requisiti riguardanti la resistività elettrica, il peso specifico e la resistenza meccanica:

- basso valore della resistività elettrica, in modo da presentare una resistenza elettrica il più possibile ridotta. A parità di lunghezza, il valore della resistenza di linea è proporzionale al rapporto (ρ/S), per cui quanto è minore il valore della resistività tanto più si riduce la sezione necessaria;
- basso valore del peso specifico, in modo che il peso totale dei conduttori sia il più possibile contenuto. Questo influisce anche sul costo dei sostegni, che possono essere più bassi e meno robusti;
- adeguato valore del carico meccanico, in relazione agli sforzi a cui il conduttore è soggetto a causa della tesatura (k) fra i sostegni, al peso proprio e ai sovraccarichi per vento e ghiaccio, sforzi che possono anche assumere valori notevoli e ai quali i conduttori devono resistere con sufficiente grado di sicurezza.

Nelle linee aeree i conduttori possono essere sia a filo unico che a corda, cioè composti da un certo numero di fili di minor diametro; le corde hanno il vantaggio di avere maggiore flessibilità e facilità di posa in opera. La composizione del conduttore è indicata mediante la formazione, corrispondente al numero di fili costituenti la corda e il loro diametro espresso in mm. Solitamente i conduttori a filo unico sono in rame, ma in rame ci sono anche conduttori a corda.

Si riportano nella seguente tabella i valori caratteristici di rame ed alluminio a 20° C

Materiale conduttore	Resistività (mm^2/km)	Peso specifico (N/dm^3)	Carico di rottura unitario per fili elementari (N/dm^2)
Rame crudo	17.8	87	370
Allumino crudo	28.4	26.5	147

Tabella 2.5 – valori caratteristici di rame e alluminio a 20° C

Per le tensioni di 132, 220, 380 kV, in Italia vengono usati soltanto conduttori bimetallici in alluminio-acciaio, denominati nel linguaggio internazionale ACSR (alluminium conductor steel reinforced). Essi sono composti da un certo numero di fili di acciaio zincato, avvolti a più strati attorno ad un filo centrale, con senso di avvolgimento invertito da uno strato all'altro; attorno a questo nucleo, detto anima d'acciaio, vengono avvolti più strati di fili d'alluminio, sempre a senso di avvolgimento invertito (mantello). I fili elementari di acciaio hanno peso specifico di 77 N/dm^3 e carico di rottura unitario minimo di 1176 N/mm^2.

Per il calcolo della sezione conduttrice e della resistenza elettrica per corde bimetalliche si considera solamente la sezione di alluminio, perché la corrente condotta dall'acciaio è trascurabile; infatti la resistività elettrica dell'acciaio è molto maggiore di quella dell'alluminio e la sezione è circa 5-7 volte più piccola. Pertanto la resistenza elettrica dell'acciaio risulterà molto maggiore di quella dell'alluminio: trattandosi di resistenze in parallelo, la resistenza equivalente coincide praticamente con quella dell'alluminio.

Per il computo del carico di rottura sono invece presi in considerazione entrambi i materiali.

Fune di guardia: nelle linee sono presenti anche dei conduttori o corde di guardia, montate in cima ai sostegni in numero di uno o di due a seconda del tipo di sostegno, che servono a proteggere le linee dalle sovratensioni di origine atmosferica. Fungono, in pratica, da parafulmini e convogliano a terra, mediante i sostegni a cui sono collegate e ai relativi impianti di terra, le correnti impulsive generate dai fulmini. Altro loro compito è quello di mettere in parallelo tutti i sostegni in modo da ridurre la resistenza totale della linea. Sono

costituite da corde di fili di acciaio zincato o di alumoweld (costituito da acciaio ricoperto da uno strato di alluminio). Alle funi di guardia non si richiede una resistenza elettrica particolarmente bassa, ma è necessario che abbiano un buon carico di rottura in quanto esse sono sottoposte agli stessi sforzi dei conduttori attivi.

Isolatori per linee aeree: nelle linee aeree in cui si impiegano conduttori nudi l'isolamento è ottenuto distanziando opportunamente i conduttori, tra loro e dai sostegni. La funzione degli isolatori è duplice: isolare meccanicamente le parti a tensione diversa e collegare meccanicamente i conduttori al sostegno, impedendo che le varie distanze tra le parti in tensione, a seguito di oscillazioni dei conduttori, possano ridursi pericolosamente. La distanza tra i conduttori e verso massa deve essere proporzionale alla tensione della linea; di conseguenza la scelta del numero e del tipo di isolatori deve dipendere da questa grandezza.

Possiamo riassumere le caratteristiche per un buon funzionamento degli isolatori in:

- resistenza meccanica, sufficiente a contrastare gli sforzi trasmessi dai conduttori, con sufficiente margine di sicurezza;
- resistività elettrica, sia di massa che superficiale, elevata in modo da ridurre la corrente di dispersione;
- rigidità dielettrica, elevata in modo da ridurre la possibilità che si inneschino archi elettrici lungo la superficie dell'isolatore a seguito di sovratensioni della linea e rigidità dielettrica di massa elevata per evitare la perforazione dell'isolatore in caso di sovratensione e la conseguente necessità di sostituzione;
- elevato sviluppo superficiale: (linea di fuga) ottenuta sagomando opportunamente l'isolatore, in modo da aumentare la tensione necessaria per produrre scariche superficiali.

I tipi di isolatori sono molteplici; una prima distinzione la si può operare tra quelli normale e quelli antisale e antinebbia, che hanno una maggiore linea di fuga e vengono usati in zone dove particolari condizioni ambientali ed atmosferiche favoriscono l'innesco di archi

elettrici. Una seconda distinzione riguarda il tipo di isolatore e il modo di attacco al sostegno, che porta a distinguere due tipi di isolatori:

- isolatori rigidi, che comprendono un unico elemento e sono fissati rigidamente al sostegno a cui trasmettono gli sforzi agenti sui conduttori; vengono normalmente utilizzati per linee aeree con tensioni non superiori ai 20-30 kV;
- isolatori a sospensione, formati da una o due catene di singoli elementi agganciati tra loro, in Italia vengono usati esclusivamente isolatori a cappa e perno: essi sono costituiti da una campana di porcellana o di vetro che si allarga alla base, dove presenta un certo numero di ondulazioni, e da una cappa di ghisa malleabile o acciaio a cui è fissato l'elemento isolante. Ogni isolatore ha una cavità superiore, detta orbita, e un perno inferiore che si innesta nell'orbita di quello sottostante. I due elementi della catena sono fissati rispettivamente al sostegno e al conduttore: dato che tra i vari elementi c'è una certa libertà di movimento rotatorio, si realizza un collegamento abbastanza flessibile. Il numero di elementi costituenti la catena di isolatori è stabilito in base alla tensione di esercizio della linea.

  I principali materiali costituenti gli isolatori sono il vetro sodocalcico temperato, per parti isolanti, la ghisa malleabile per le cappe, l'acciaio inossidabile per le copiglie.

  Tutti i materiali devono essere resistenti alla corrosione o resi tali mediante zincatura a caldo. Il vetro è nettamente preferito alla porcellana per il minor costo, per la maggiore possibilità di controllo della omogeneità della massa dell'isolatore e per la totale evidenza da terra dei guasti lungo la linea.

Sostegni per le linee: i sostegni hanno la funzione di mantenere i conduttori lontani tra loro, dal terreno e da eventuali corpi estranei. Essi hanno diverse caratteristiche a seconda del livello di tensione della rete cui sono destinati, delle sollecitazioni meccaniche e del tipo di materiale usato. I sostegni solitamente adottati nel nostro Paese per le linee di trasmissione e distribuzione ad alta tensione sono in

traliccio di acciaio o cemento armato; mentre per la media e bassa tensione si usano maggiormente sostegni di cemento armato o di legno.

2.6.2 Linee elettriche in cavo

Per cavo elettrico si intende un insieme di conduttori riuniti tra loro (può anche essere un unico conduttore), ciascuno isolato rispetto agli altri e verso l'esterno; ogni conduttore con il proprio isolante costituisce un anima del cavo. Le linee in cavo possono essere aeree o interrate.

Il cavo aereo è una tecnologia ben consolidata per le linee di bassa tensione, ed in seguito alla risoluzione di problemi strutturali derivanti dal maggior peso dei conduttori, è divenuta recentemente praticabile anche per le linee di media tensione. Le tre fasi, rivestite di materiale isolante, sono intrecciate a formare un unico cavo che viene sostenuto da una palificata; tale configurazione permette di eliminare i campi elettrici e di ridurre drasticamente i campi magnetici. Non necessita di distanze di sicurezza per la salvaguardia dalle scariche elettriche e pertanto indicata soprattutto nell'attraversamento delle aree boschive, evitando così tagli e potature rilevanti per l'ambiente.

Per le linee di bassa tensione Enel utilizza normalmente il cavo aereo isolato negli ambiti extraurbani e rurali; per la media tensione l'utilizzo avviene generalmente in zone che presentano particolari requisiti ambientali, quali i boschi.

L'impiego di cavi interrati rappresenta la soluzione migliore dal punto di vista dell'impatto visivo, anche se presenta problemi di impatto nelle fasi di posa e manutenzione perché devono essere aperte trincee con disturbo all'ambiente circostante e alla circolazione. Il cavo interrato viene utilizzato in ambiti urbani per le linee di bassa tensione; viene adottato anche fuori dai centri urbani nei casi vi siano particolari ragioni o vincoli che richiedono l'interramento della linea.

Nel caso di linee ad alta tensione aumentano enormemente le difficoltà di natura tecnica, economica ed ambientale; per questi

motivi le linee a 132-150 kV vengono realizzate in cavo soltanto negli attraversamenti urbani per raggiungere le cabine primarie. Per linee a tensione maggiore (380 kV) i problemi tecnici,l'impatto ambientale e i costi sono tali da rendere non praticabile la soluzione del cavo interrato. In nessun Paese al mondo infatti viene utilizzato il cavo interrato nelle reti di trasmissione a 380 kV, se non per brevissimi raccordi ed in situazioni particolari.
Le linee interrate sono costituite da terne trifase con varie geometrie sistemate in apposito alloggiamento sotterraneo. I cavi più usati sono cavi unipolari cordati da elica e cavi unipolari con conduttore di rame isolati in gomma. In genere i cavi sono interrati alla profondità di 0,8-1,20 metri dal piano di campagna, salvo profondità maggiori negli attraversamenti di opere speciali.
I cavi possono essere posati direttamente nel terreno in trincea e disposti linearmente sullo stesso piano (disposizione a terna piana) o in altre configurazioni di posa, ad esempio possono essere disposti a triangolo (disposizione a trifoglio).

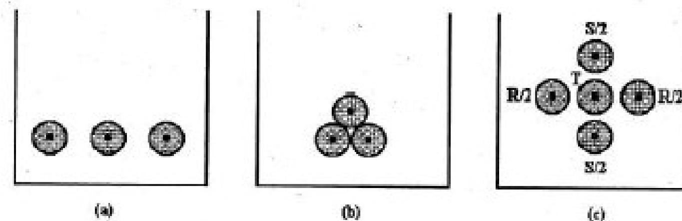


fig. 2.6 Disposizione di cavi: a) terna piana; b) trifoglio; c) con separazione di fasi

Può essere fatta una prima distinzione, in base al numero delle anime, in cavi unipolari, tripolari e multipolari, a seconda della presenza o meno del conduttore di protezione per il collegamento dell'impianto a terra.
Inoltre, in funzione del tipo di isolante, i cavi si distinguono in:

1 *cavi isolati in carta impregnata,* nei quali l'isolamento è costituito da sottili strati di carta di pura cellulosa, impregnata con olio denso o con opportune miscele olio-resine, avvolte intorno al conduttore. Sono utilizzabili per la bassa tensione fino a 60 kV.

2 *cavi ad isolante solido*, costituito da resine termoplastiche o da materiale elastomerico, costituito da mescole a base gomma naturale o sintetica, come la gomma etilpropilenica (EPR) e quella siliconica; l'isolamento è disposto in modo uniforme e compatto attorno al conduttore, mediante processo di estrusione. Si hanno cavi in gomma butilica per tensioni fino 20kV, cavi polietilene reticolato e in EPR per tensioni fino a 132 kV;

3 *cavi ad olio fluido*: sono cavi del tipo a miscela che sostituiscono all'olio denso dei cavi in carta impregnata, olio fluido, a bassa o alta pressione, mentre l'isolante è ancora costituito da strati di carta; si usano per alte tensioni fino a 380 kV.

L'isolante è una parte fondamentale del cavo; dalle sue caratteristiche dipendono in gran parte le prestazioni del cavo in termini di tensioni di isolamento, corrente trasmissibile, comportamento termico.

Nei cavi multipolari di elevata sezione è presente un materiale di riempimento, generalmente costituito da fibre tessili, che serve a riempire gli interstizi tra le anime, conferendo al cavo la forma rotonda.

Per i cavi con tensione nominale di isolamento verso terra maggiore di 3,6 kV è necessario uno schermo; esso consiste in un sottile nastro di rame avvolto a spirale ed è applicato sull'insieme delle anime o singolarmente attorno all'isolante di ciascuna. La schermatura serve a modificare le linee di forza del campo elettrico che si formano all'interno del cavo, in modo da diminuire le sollecitazioni dielettriche sull'isolante e confinare il campo stesso tra conduttore e schermo. Infatti conduttore e schermo possono essere visti come le due armature di un condensatore cilindrico: le linee di forza del campo elettrico si svilupperanno in direzione radiale. La presenza di componenti tangenziali mal sopportata dall'isolante è così evitata; un cavo di questo tipo è detto a campo radiale.

L'isolante esterno (cintura), l'armatura metallica e la guaina esterna hanno il compito di proteggere il cavo da agenti ambientali, dalle sollecitazioni meccaniche e dalle interferenze. I conduttori sono

generalmente in rame o in alluminio, con prevalenza del primo; possono essere sia a filo unico che a corda. I conduttori di rame possono essere nudi o rivestiti: il rivestimento è costituito da un sottile strato di metallo adatto, quale stagno, lega di stagno o lega di piombo.

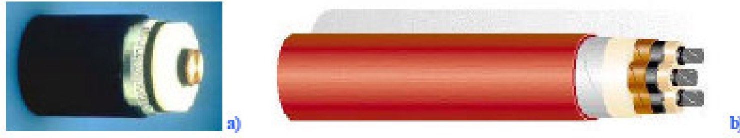


fig. 2.5 a) cavo unipolare – b) cavo tripolare
entrambi per linee interrate a MT

2.6.2.1 Caratteristiche funzionali dei cavi

Tensioni nominali: quando si deve utilizzare un cavo, occorre scegliere un livello di isolamento adatto alla tensione di esercizio del sistema elettrico in cui esso deve essere impiegato.
Le tensioni di riferimento per le quali è previsto l'isolamento sono:

- Tensione nominale di isolamento verso terra (U_0), cioè tra conduttore e massa;
- Tensione nominale di isolamento tra le fasi (U) non definibile nel caso dei cavi unipolari.

All'aumentare del valore nominale della tensione di esercizio, occorre scegliere cavi con tensioni di isolamento sempre più elevate. Un'altra caratteristica fondamentale per la scelta dei cavi è *la portata*: la portata è la massima intensità di corrente che può circolare in ogni conduttore, in determinate condizioni di posa e di esercizio, senza che la temperatura superi quella ammissibile dall'isolante. La temperatura ammissibile in esercizio è anch'essa una caratteristica del cavo, stabilita dalla normativa in base al tipo di isolante.

2.6.2.2 Tipo di posa

Le condizioni di posa sono di importanza fondamentale nel progetto di un cavo, sia per quanto riguarda la determinazione della portata del cavo stesso, sia per quanto concerne le protezioni dalle sollecitazioni esterne.
Si possono effettuare i seguenti tipi di posa:

- diretta in terra: si realizza una trincea in cui viene depositato il cavo, circondato da uno strato di sabbia argilloso. Al di sopra del cavo viene messo uno strato di mattoni o una lastra di cemento per protezione;
- in cabalette: si ricorre alla disposizione nel terreno di cabalette di cemento riempite successivamente di sabbia;
- in tabulazioni: si esegue uno scavo dove disporre la tabulazione di terracotta o cemento. Al suo interno si colloca un filo di ferro zincato per consentire la successiva posa del cavo, che è legato all'estremità del filo;
- in cunicoli: si realizza di norma all'interno delle stazioni di trasformazione o di edifici industriali per rendere più accessibili i cavi;
- in aria: i cavi sono impiegati in sostituzione dei conduttori nudi, quasi esclusivamente per le linee a bassa tensione.

2.6.3 Linee blindate isolate in gas (GIL)

Le linee isolate blindate in gas, chiamate tecnicamente GIL, sono l'evoluzione diretta delle tecnologie sviluppate per le stazioni elettriche con gas isolante SF_6.
Questa nuova tecnica costruttiva prevede la realizzazione di tre conduttori unipolari, in cui la fasi sono disposte singolarmente all'interno di tre involucri distinti. Nell'esecuzione unipolare il conduttore di fase tubolare è mantenuto in posizione centrale da un isolatore in resina all'interno di un involucro (vedi figura 2.6); sia i conduttori interni che gli involucri sono in alluminio o in lega di alluminio.
Il gas isolante può essere costituito da SF_6 allo stato puro e alla pressione di circa $3\text{-}5 \cdot 10^6$ Pa, o da una miscela di SF_6 e di N_2 nel rapporto di 10-20% a pressioni più alte fino a 10^6 Pa. Questa seconda realizzazione impiantistica risulta essere più compatibile con l'ambiente e meno costosa.

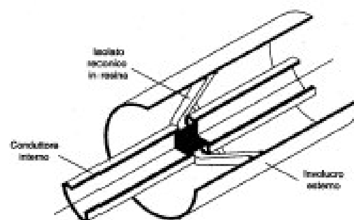


fig. 2.6 – Schema di un GIL

Con questa nuova tecnologia per ottimizzare il campo elettrico il rapporto tra il diametro interno D_e, dell'involucro e quello esterno del conduttore D_c deve essere pari a 2,72; nelle pratiche applicazioni qualsiasi rapporto tra 2,5 e 3 può essere adottato, poiché in questo intervallo il campo elettrico, fisso D_e, aumenta meno di 0,5% rispetto a quello ottimale.

Le linee GIL sono utilizzate per tensioni nominali di 220-380 kV e presentano le seguenti caratteristiche di esercizio:

- anche con elevate potenze trasmesse le cadute di tensione sono accettabili e le perdite sono molto basse;
- in un ampio campo di carico la capacità di esercizio dà un vantaggioso effetto rifasante alla partenza;
- le potenze reattiva e capacitiva emergono in modo rilevante solo con carichi molto bassi;
- alle massime potenze trasmesse le perdite per effetto Joule complessive lungo l'elettrodo non superano 180 W/m nel caso di tensioni a 220 kV, così che le sovratemperature prevedibili per i conduttori di fase e per gli involucri risultano generalmente più che accettabili;
- un tipico guasto risulta essere tra la fase e l'involucro, in questa condizione le tensioni degli involucri dipendono fortemente dalla tecnica di messa a terra.

Queste linee blindate sono composte da elementi modulari di dimensioni compatibili con le esigenze di trasporto, costruiti e provati in officina. Tali elementi sono poi uniti in un sito innestando i conduttori e saldando gli involucri; essi sono adattabili per installazione sia in galleria che nel terreno.

Il costo stimato si colloca a circa 10 volte quello di una equivalente linea aerea se il tracciato è abbastanza rettilineo, in pianura, senza particolari ostacoli e può salire a 12-15 per tracciati più difficili. Si deve considerare che il costo globale può diventare inferiore a due se, nei confronti, si eseguono le valutazioni economiche inerenti alle minori perdite e alla minore superficie del terreno da vincolare come servitù. Le prime realizzazioni già attuate dall'industria sono molto suggestive e fanno prevedere una progressiva diffusione degli elettrodotti blindati, con conseguente riduzione dei loro costi di produzione.

2.7 Parametri delle linee elettriche

Le grandezze di una linea elettrica che influiscono sui valori della tensione e della corrente a monte e a valle della linea stessa, nel circuito elettrico in cui è inserita la linea stessa, sono:

1. la resistenza ohmica (R) e la reattanza (X) dei conduttori percorsi dalla corrente principale, che determinano cadute di tensione, cosicché la tensione varia da un punto all'altro della linea; nel loro insieme costituiscono l'impedenza (Z) della linea: $Z=R + jX$. (2.7.1)
2. la conduttanza (G) e la suscettanza (B) in derivazione tra i conduttori della linea, che, sotto l'azione della tensione esistente tra i conduttori stessi, assorbono una corrente trasversale, cosicché la corrente principale nei conduttori varia da un punto all'altro della linea; nel loro insieme costituiscono l'ammettenza trasversale (Y) della linea: $Y=G+jB$ (2.7.2)

   Queste grandezze sono uniformemente distribuite lungo la linea: i parametri riferiti a 1 km di line si chiamano *costanti fondamentali della linea* e si indicano con le corrispondenti lettere minuscole (r, x, b, z, g, y).

2.7.1 Resistenza

La resistenza di linea (r) che attraversata dalla corrente (I) produce una caduta di tensione V = r·I, in fase con la corrente, rappresenta l'opposizione del materiale conduttore al passaggio della corrente elettrica e si calcola con la formula:

$$r = \frac{K \cdot \rho \cdot L}{S} \tag{2.7.1.1}$$

Il fattore è un coefficiente > 1 che fa aumentare la resistenza: tale aumento è determinato nel caso di linee aeree dalla maggiore lunghezza effettiva del conduttore rispetto a quella teorica ella linea a causa della configurazione a catenaria e nel caso di conduttori a corda, dal fatto che i fili sono avvolti a spirale. Nel casi di cavi il fattore K è determinato dall'effetto di cordatura e dal fenomeno delle correnti parassite nelle eventuali guaine metalliche di protezione.

2.7.2 Reattanza

La reattanza X di un circuito elettrico può essere definita come la f.e.m. di autoinduzione che si genera in esso quando è percorso da una corrente alternata unitaria. Se il conduttore è percorso da una corrente, la f.e.m. di autoinduzione è data da:

$$E = j\omega X = j\omega L \cdot I \tag{2.7.2.1}$$

dove L è il coefficiente di autoinduzione o induzione propria del circuito.

Nel caso di linee trifase, alla f.e.m. di autoinduzione si aggiungono le f.e.m. di mutua induzione generate nel conduttore considerato dalle correnti che percorrono gli altri due conduttori del sistema. Riferendosi a 1 km di linea, per il conduttore della fase (a) si avrà:

$$E_a = j\omega m_{aa} I_a + j\omega m_{ab} I_b + j\omega m_{ac} I_c \tag{2.7.2.2}$$

Confrontando le equazioni (2.7.2.1) e (2.7.2.2) deduciamo:

$$E_a = j\omega 1_a I_a \tag{2.7.2.3}$$

dove 1_a è l'induttanza di servizio del conduttore a.

L'induzione di servizio 1_a rappresenta quell'induttanza fittizia che percorsa dalla corrente I_a darebbe luogo alla stessa f.e.m. di

autoinduzione prodotta dalle tre correnti di fase. Analogamente si definisce una reattanza di servizio.

2.7.3 Suscettanza

Per determinare la suscettanza di una linea trifase è necessario introdurre il concetto di capacità di servizio di un conduttore, così come nel caso della reattanza si è introdotto il concetto di induttanza di servizio.

La capacità di servizio è quella grandezza che moltiplicata per E, dà in valore numerico la totale corrente capacitiva derivata lungo 1 km di conduttore per effetto della capacità del conduttore sia verso terra che verso gli altri conduttori.

2.7.4 Conduttanza

Lungo tutto il percorso del conduttore di linea si irradia verso lo spazio circostante una corrente la cui componente attiva è imputabile alle perdite nel dielettrico. Il parametro che tiene conto di questa perdita è la *conduttanza chilometrica* g, la cui espressione è data da:

$$g = \frac{p}{E^2} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{S}{km} \qquad (2.7.4.1)$$

- p è la perdita in kW per km di conduttore;
- E è la tensione di fase (kV);
- S è la sezione del materiale.

Le perdite trasversali lungo le linee aeree sono di due specie: lungo la superficie degli isolatori e per effetto corona.

Le *perdite per scariche superficiali lungo gli isolatori* sono dovute alla non perfetta tenuta superficiale degli stessi, che consente la richiusura a terra, attraverso il sostegno, di una piccola corrente trasversale. Queste perdite aumentano all'aumentare della tensione di esercizio e al diminuire della distanza del conduttore dal sostegno; dipendono inoltre dallo stato degli isolatori e dalle condizioni atmosferiche, risultando massime in caso di pioggia.

L'*effetto corona* consiste nell'emissione di cariche elettriche attorno al conduttore ed è dovuto al campo elettrico che si crea per effetto delle differenze di potenziale tra i conduttori e tra questi e la terra. In questo caso la conduttanza è dovuta ai fenomeni di ionizzazione: gli elettroni, presenti nell'aria per ionizzazione da parte di raggi cosmici o di radiazioni terrestri, sottoposti al campo elettrico vengono accelerati e, se il campo è sufficientemente intenso, hanno energia per ionizzare altre molecole che vengono urtate, provocando così un andamento a valanga e perciò una scarica.
Il fenomeno è limitato agli strati d'aria più vicini al conduttore, dove è massima l'intensità di gradiente di potenziale e si manifesta con una zona di luminosità bluastra attorno al conduttore, da cui il nome effetto corona, e con il caratteristico ronzio. Le perdite per effetto corona si verificano solo quando il gradiente di potenziale sulla superficie del conduttore supera la rigidità dielettrica dell'aria che, in condizioni ambientali normali è di circa 30 kV/m.
Indicando con E il valore efficace della tensione di fase del sistema, l'effetto corona si manifesta quando $E > E_c$ con E_c tensione critica che dipende dai parametri geometrici della linea e dalle condizioni dell'aria:

$$E_c = 49.2 \cdot m \cdot \delta \cdot \frac{d}{2} \cdot \log \frac{2D}{d} \qquad (2.7.4.2)$$

- m è il coefficiente di scabrosità del conduttore, che tiene conto dell'aumento del gradiente di potenziale sulla superficie del conduttore originato dalla presenza di irregolarità sulla superficie stessa;
- δ è la densità relativa dell'aria ed è uguale a $\frac{0.386 \cdot p}{273 + \theta}$;
  - p è la pressione atmosferica (mmHg);
  - θ è la temperatura ambiente (°C);
- d è il diametro del conduttore;
- D è la distanza tra i conduttori.

Nella progettazione delle linee in alta tensione si cerca di evitare l'effetto corona in condizioni di tempo normale, facendo in modo che

sia $E_c > E$. L'aumento della tensione critica si realizza con accorgimenti costruttivi, basati sull'aumento del diametro d dei conduttori, i più comuni sono:

- l'impiego di conduttori in alluminio-acciaio, aventi diametro maggiore di quelli di rame, a parità di resistenza elettrica;
- l'impiego di conduttori binati e trinati (due o tre corde in parallelo per fase), aventi un raggio maggiore rispetto al conduttore unico.

3-Effetti biologici e sanitari indotti da campi elettromagnetici a bassa frequenza

3.1 Effetti biologici dei campi elettromagnetici

I campi elettromagnetici a bassa frequenza ELF, dall'inglese Extremly Low Frequency, sono campi elettrici (E) e magnetici (B) oscillanti a frequenze comprese tra 0 – 300Hz. Questi campi rientrano nella gamma delle radiazioni non ionizzanti, sono cioè caratterizzati da un'energia insufficiente ad indurre fenomeni di ionizzazione o rompere legami macromolecolari. I campi ELF d'origine naturale sono estremamente bassi, rispettivamente dell'ordine di 0,0001 V/m e 0,00001 μT. L'esposizione d'esseri umani ai campi ELF artificiali (50/60 Hz) è associata alla produzione, trasmissione ed uso dell'energia elettrica.

Fino a qualche decennio fa tali radiazioni non erano considerate in grado di interagire con i sistemi biologici. Con il passare degli anni sono stati condotti diversi studi e sono state portate evidenze di molti effetti biologici dell'esposizione ai campi elettromagnetici, anche se persistono opinioni contrastanti sulle possibili conseguenze avverse per la salute. Quando un organismo biologico viene immerso in un campo elettromagnetico si ha una perturbazione dell'equilibrio elettrico a livello molecolare, in quanto tali campi generano correnti e campi elettrici variabili nel tempo che a loro volta inducono una stimolazione diretta delle cellule eccitabili, come quelle dei tessuti nervoso e muscolare.

Una prima e importante distinzione va fatta tra EFFETTI BIOLOGICI e EFFETTI SANITARI. Quest'aspetto è stato precisato dall'OMS - Organizzazione mondiale della sanità – nel Promemoria n° 182 del 1998:

- Si verifica un <u>effetto biologico</u> quando l'esposizione alle onde elettromagnetiche provoca qualche variazione fisiologica notevole o rilevabile in un sistema biologico

- Si ha invece un <u>effetto sanitario</u> (di danno alla salute) quando l'effetto biologico è tale da non poter essere compensato naturalmente dall'organismo, portando a qualche condizione di danno alla salute, intesa come stato di completo benessere fisico-mentale e socio-comportamentale.

Gli effetti biologici sono a loro volta distinti in DIRETTI e INDIRETTI: gli <u>effetti diretti</u> risultano dall'interazione diretta dei campi con il corpo del soggetto esposto; quelli <u>indiretti</u> implicano l'interazione con oggetti ad un potenziale elettrico diverso da quello del corpo. Esistono due possibili meccanismi di accoppiamento indiretto: correnti di contatto, che risultano dal contatto con un oggetto a diverso potenziale, e accoppiamento con strumentazione medica impiantata in un individuo, come pacemaker e protesi.

Il termine "effetto biologico" viene utilizzato in modo neutro sia per indicare effetti positivi, come la stimolazione tissutale che si applica per migliorare ad esempio la guarigione di fratture ossee, sia per effetti negativi, come l'induzione di tumori o la produzione di danni ai sistemi nervoso, immunitario, cardiovascolare e riproduttivo.

Tra gli effetti sanitari si distinguono effetti:

- a breve termine o immediati, di natura acuta o deterministica, effetto con presenza di soglia di esposizione
- a lungo termine o stocastici, di natura cronica, senza la presenza di soglia (classico esempio è l'insorgenza di tumori).

Si deduce facilmente da questa distinzione che per gli effetti con soglia di esposizione la protezione è molto semplice, basta infatti limitare l'esposizione all'agente nocivo ad un valore inferiore a quello di soglia perché l'effetto non si verifichi.

Allo stato attuale si hanno conoscenze certe solo per quanto concerne gli effetti acuti di natura deterministica, per gli effetti cronici sono necessari ulteriori studi.

Effetti acuti e cronici possono essere diversi a seconda della frequenza (f):

- effetto acuto con f < a 100 Hz: abbiamo un'interferenza delle correnti indotte con i meccanismi fisiologici di attivazione muscolare e della percezione sensoriale, quindi per esposizioni sufficientemente intense si possono verificare sensazioni tattili o visive disturbate o contrazioni muscolari involontarie;
- effetto cronico con f < a 100 Hz: si possono verificare sintomi soggettivi come cefalee ed insonnia e sintomi oggettivi come malattie degenerative e tumori;
- effetto acuto con f > a 100 Hz: sono dovuti al riscaldamento locale dei tessuti provocati per effetto Joule delle correnti indotte;
- effetto cronico con f > a 100Hz: si hanno degli effetti a livello del sistema nervoso centrale e sugli apparati circolatorio, neurovegetativo e neuroendocrino.

3.2 Proprietà elettromagnetiche dei tessuti biologici

In ambito elettromagnetico i tessuti biologici sono caratterizzati, alla stregua di altri materiali, dalle grandezze macroscopiche quali la conducibilità elettrica (σ), la permettività elettrica (ε) e la permeabilità magnetica (μ) che dipendono dalla frequenza.

Nei meccanismi d'interazione sono rilevanti i fenomeni di cessione dell'energia del campo elettromagnetico al tessuto. L'energia del campo è ceduta alle cariche elettriche (elettroni, ioni, molecole dipolari e unipolari) che sono poste in movimento. Durante il loro moto le cariche collidono con le altre molecole del tessuto trasformando così la loro energia meccanica in calore. Le cariche elettriche, a seconda della loro massa, reagiscono più o meno rapidamente alle variazioni del campo, dando così luogo a diversi fenomeni che dipendono dalla frequenza. In generale i tessuti biologici sono materiali non ferromagnetici, la loro permeabilità magnetica (μ) è praticamente uguale a quella dell'aria. La permettività elettrica (ε) varia invece con la frequenza e con il tipo di tessuto umano. Al di sotto del MHz il tessuto umano ha un comportamento

anisotropico, la conduttività varia cioè da una direzione all'altra. Generalmente la permettività decresce all'aumentare della frequenza.
In generale i tessuti biologici non presentano proprietà magnetiche e possono quindi essere considerati "trasparenti" al campo magnetico.
Un buon conduttore riflette quasi completamente le onde elettromagnetiche e dissipa energia a causa delle correnti indotte che in esso si producono. Al contrario, un dielettrico è quasi completamente trasparente alle onde elettromagnetiche, ma può immagazzinare una parte di energia. Il corpo umano, in una certa misura, può fare entrambe le cose. Il suo comportamento, conduttore o dielettrico, è descritto da due grandezze fondamentali:

- Conducibilità elettrica σ $[(\Omega\cdot m)^{-1}=S/m]$
- Costante dielettrica assoluta ε $(c^2/N\cdot m^2)$

Viene definito fattore di dispersione, o tangente di perdita (tanα), per valutare se un tessuto è più o meno un buon conduttore, la quantità

$$\tan\alpha = \frac{\sigma}{2\pi\cdot\varepsilon\cdot f}$$

dove f è la frequenza dell'onda.
Un tessuto si comporta tanto più da buon conduttore quanto più è elevato il valore di tanα; alle basse frequenze, quindi possiamo assimilare tali tessuti a buoni conduttori.
I modelli dosimetrici costituiscono gli strumenti fisico matematici che permettono di risalire dalle grandezze derivate, campo elettrico e magnetico, a quelle primarie, densità di corrente indotta e distribuzione superficiale di carica (per campi con frequenza fino a 50 Hz), una volta note le condizioni di esposizione e le caratteristiche del campo.
L'IRPA-INIRC ha definito dei limiti primari, espressi cioè da una grandezza dosimetrica, direttamente correlabile agli effetti biologici osservabili. Tali grandezze sono il SAR (Specific Absorption Rate) (W/Kg), per esposizione a campi elettromagnetici ad alta frequenza, e la densità di corrente $J(A/m^2)$ indotta nel corpo umano, per campi a bassa frequenza.

La densità di corrente indotta, dall'esposizione ad un CEM di bassissima frequenza, è la grandezza fisica maggiormente correlata all'effetto biologico di tipo acuto. Essendo però interna ai tessuti non è possibile misurare nell'uomo, in condizioni reali di esposizione, il valore di tale grandezza primaria se non con metodi invasivi, é stato pertanto necessario sviluppare dei modelli fisici e numerici attraverso i quali tale grandezza possa essere correlata al campo elettrico e magnetico, che essendo esterni al corpo umano risultano direttamente misurabili.
Si parla di limiti secondari facendo riferimento quindi a valori limite di campo elettrico E(V/m), campo magnetico H(A/m) e densità di potenza incidente (W/m^2).

3.2.1 Campo elettromagnetico ad alta frequenza

A frequenze superiori ai 100Hz, il meccanismo d'interazione CEM – materia, consiste principalmente nell'assorbimento dell'energia elettromagnetica incidente.
Il modello più semplice per lo studio dei meccanismi d'accoppiamento alle alte frequenze sfrutta l'ipotesi che le dimensioni del soggetto esposto siano molto maggiori della lunghezza d'onda. Si ha quindi che una parte della radiazione in arrivo viene riflessa ed un'altra parte penetra nel materiale biologico, depositandovi potenza e attenuandosi quindi esponenzialmente.
La profondità di penetrazione è inversamente proporzionale alla frequenza del campo e alla conducibilità elettrica del tessuto esaminato. Più alta è la frequenza meno profondamente penetra nel corpo, depositando tutta l'energia negli strati superficiali.
La grandezza dosimetrica che meglio descrive lo scambio energetico che c'è tra radiazioni elettromagnetiche e materia vivente è il SAR, cioè la quantità di energia ceduta nell'unità di tempo divisa per la massa corporea (W/Kg).

$$SAR = \frac{\sigma \cdot E^2 \text{int}}{\rho} \qquad (3.1)$$

σ = conducibilità del tessuto (S/m)
Eint = campo elettrico indotto internamente (V/m)
P = densità del tessuto (Kg/m^3)
L'energia elettromagnetica viene dissipata nel corpo sotto forma di calore: ed è proprio il riscaldamento dei tessuti a provocare effetti nocivi per la salute nel caso di CEM ad alta frequenza.
I valori di SAR indicati dall'ICNIRP come limiti sono 0,4 W/Kg per lavoratori e 0,08 W/Kg per la popolazione.

3.2.2 Campo elettromagnetico a bassa frequenza

L'esposizione a campi elettrici e magnetici di bassa frequenza implica un assorbimento trascurabile di energia elettromagnetica con, di conseguenza, un aumento non apprezzabile della temperatura corporea. In questo caso l'unico effetto da considerare è l'induzione di correnti all'interno del corpo. L'approssimazione adottata comunemente è quella statica, che ci permette di considerare i campi elettrico e magnetico disaccoppiati. Le condizioni applicabili fino a 50-100 kHz che consentono di affrontare il problema dei due campi separatamente devono essere:

- dimensioni dell'oggetto esposto molto minori della lunghezza d'onda
- dimensioni e distanza piccole rispetto alla lunghezza d'onda o alla profondità di penetrazione
- i tessuti biologici devono poter essere considerati buoni conduttori

Vediamo come si procede.

3.2.2.1 Accoppiamento ai campi elettrico e magnetico

- *Campo elettrico*

Consideriamo un corpo immerso in un campo elettrico, vogliamo calcolare il valore del campo internamente al corpo; a tale scopo bisogna distinguere il campo nella sua componente tangenziale (E_t) e

nella sua componente normale (E_n) alla superficie di separazione dei due mezzi.
Per le componenti tangenziali sarà valida la seguente uguaglianza nei due mezzi:

$$E_{t1}=E_{t2} \qquad (3.2)$$

e per le componenti normali risulterà:

$$\sigma_1 \cdot E_{n1}=\sigma_2 \cdot E_{n2} \qquad (3.3)$$

Considerando i valori di σ nell'aria e nel tessuto biologico ($\sigma_{aria}=10^{-13}$, $\sigma_{biologico}=10^{-1}$), la componente delle linee di forza che risulta predominante sarà quella perpendicolare alla superficie di separazione tra l'interno e l'esterno del corpo.
Per i campi statici il rapporto tra i valori esterno ed interno, in queste condizioni, di E è circa 10^{-12}. a 50 Hz diventa dell'ordine di 10^{-8}.
Poiché in realtà il campo elettrico dovuto ad un CEM non è costante, ma varia nel tempo in modo sinusoidale, si generano delle correnti indotte, che costituiscono la primaria conseguenza dell'esposizione. La loro intensità è proporzionale alla frequenza e all'ampiezza del campo elettrico secondo la seguente formula:

$$J_{ind}=A_E\, f\, E \qquad (3.4)$$

La costante A_E dipende dalla dimensione e dall'orientamento del corpo, ma soprattutto dal particolare tessuto considerato, vale circa $3 \cdot 10^{-9}$ As/Vm in zone come la testa o la regione cardiaca.
I risultati egli studi attualmente disponibili mostrano che gli effetti per esposizioni fino a 20 kV/m sono pochi ed innocui.

- *Campo magnetico*

Nel caso di fenomeni statici si può dire che un organismo non risente in modo significativo della presenza di un campo magnetico. La situazione cambia notevolmente per campi oscillanti: per la legge d'induzione di Faraday, ogni campo magnetico variabile nel tempo induce in un conduttore delle correnti interne. A loro volta, tali correnti sono sorgenti di un campo magnetico secondario in grado di perturbare il campo originario. È possibile dimostrare che la

perturbazione (dipendente dalla frequenza, dalla conducibilità dei tessuti e dalle dimensioni del soggetto esposto) nel caso dell'uomo è trascurabile per frequenze fino ai 100 kHz.

Le condizioni di raccordo tra i due mezzi per il campo magnetico sono:

$$B_{n1}=B_{n2} \quad (3.5)$$

$$H_{t1}=H_{t2} \quad (3.6)$$

con $B = \mu H$

La permeabilità magnetica della maggior parte dei tessuti biologici ha valori prossimi a quello dello spazio libero: $\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}$ H/m.

La distribuzione di campo magnetico è uguale a quella che si avrebbe in assenza dell'individuo esposto; il campo al suo interno è pari a quello esterno.

La relazione che lega la densità di corrente indotta all'ampiezza del campo magnetico è data da:

$$J_{ind}=\pi\,(L/2)\sigma\, f\, B \quad (3.7)$$

Le correnti indotte attraversano completamente l'individuo, interessando anche gli organi interni e scegliendo i percorsi a minore resistenza (cioè i tessuti a più alta conducibilità), fino a scaricarsi a terra attraverso le piante dei piedi. Queste correnti, fortunatamente, non hanno mai intensità troppo elevate, perché le costanti che troviamo nelle formule (3.4) e (3.7) sono molto minori di 1; ciò garantisce una limitazione degli effetti anche nel caso di campi molto intensi. Infine, nel caso di un'esposizione a corpo intero ad un campo sinusoidale a 50 Hz si giunge ai valori riportati in tabella:

Induzione magnetica (mT)	Densità di corrente (mA/m^2)	Effetti biologici
< 0,5	< 1	Nessun effetto rilevabile
0,5 – 5	1 – 10	Effetti minimi
5 – 50	100 – 1000	Stimolazione dei tessuti eccitabili. Possibilità di effetti sanitari
> 500	> 1000	Extrasistole e fibrillazione ventricolare. Effetti acuti

Tabella 3.1- Effetti biologici per esposizioni a corpo intero

3.3 Studi sull'esposizione a campi magnetici

Gli strumenti per valutare il rischio per la salute sono diversi ed esistono vari criteri per analizzare gli svariati risultati. Quelli di maggior rilevanza sono:

- Gli studi in vitro: riguardano gli effetti sulle cellule, tra i quali alterazione dell'attività enzimatica, sintesi proteica, omeostasi del calcio, ecc... In letteratura sono riportati numerosi studi in vitro riguardanti differenti parametri biologici, che potrebbero risultare alterati, in seguito ad un'esposizione ai campi elettromagnetici. Ad oggi la risposta ad un basso livello di esposizione ai campi elettromagnetici meglio documentata è l'induzione di proteine dette dello "Shock Termico" (heat-shock). Tali proteine sono preposte alla difesa dell'organismo a seguito di aumenti di temperatura o condizioni tossiche che possono portare alla denaturazione di proteine vitali per le cellule. Alcuni dati indicano che esposizioni ai CEM stimolano le cellule a produrre queste proteine e che una preesposizione ai campi elettromagnetici potrebbe indurre una protezione delle cellule contro agenti di stress, come per esempio il calore, il perossido di idrogeno (H_2O_2), ecc... Da queste osservazioni Di Carlo e collaboratori hanno dedotto che esposizioni lunghe o quotidianamente ripetute a CEM potrebbero diminuire i livelli di proteine di heat-shock, portando ad un abbassamento delle difese dell'organismo contro un successivo attacco da parte di un agente nocivo.
- Gli studi in vivo su animali, finalizzati a verificare alcuni end-points biologici, tra cui proliferazione cellulare, promozione, copromozione e progressione tumorale, sintesi della melatonina, ecc... Emerge con sufficiente evidenza l'azione dei campi sulla produzione della melatonina. Molti degli effetti biologici osservati negli animali appaiono essere direttamente o indirettamente associati al sistema nervoso, in particolare nei mammiferi, alla ghiandola pineale. Tale ghiandola è una struttura

neurale in stretto collegamento con il sistema visivo. Infatti, la produzione cicardiana della melatonina da parte dell'epifisi è determinata dal foto-periodo ambientale in cui l'animale vive. La luce determina la cessazione di produzione della melatonina, mentre durante le ore notturne la produzione di questo ormone sale ad alti livelli. Numerosi studi dimostrano che l'aumentata secrezione di melatonina durante la notte appare notevolmente attenuata dall'esposizione ai CEM a bassa frequenza, tale secrezione risulta inoltre ritardata di circa due ore. Il meccanismo attraverso cui i campi alterano il ritmo di secrezione, però, non è stato ancora definito.
Diverse ricerche hanno utilizzato test in vivo per studiare l'azione epigenetica dei campi magnetici a bassa frequenza nel caso di tumori della pelle, al fegato, al cervello e alla mammella nei roditori. Tre studi sulla promozione del tumore della pelle (Mc Lean et al. 1991, Rannurg et al. 1994) non hanno provato alcun effetto di promozione di tumori indotti chimicamente legato all'esposizione continua o intermittente a campi magnetici a frequenza industriale. Studi sul tumore della mammella sviluppato in roditori trattati con cancerogeni chimici hanno indicato un effetto promotore dei campi magnetici ELF nel range 0,01 – 30 mT (Beniashvilli et al. 1991; Loscher et al. 1993; Mevissen et al. 1993, 1995; Baum et al. 1995; Loscher e Mevissen 1995). L'ipotesi che è stata fatta è che l'incremento dei tumori sui topi esposti ai campi elettromagnetici sia dovuto alla soppressione della melatonina (Stevans et al. 1987, 1992). Sono però necessarie ulteriori conferme.

- <u>Studi su volontari</u>: diversi studi hanno mostrato che la maggioranza delle persone può percepire campi elettrici alla frequenza di 50/60Hz più intensi di 20kV/m; la percezione è il risultato delle cariche alternativamente indotte sulla superficie del corpo, che causano la vibrazione dei peli. Nei soggetti esposti ai campi elettrici e magnetici combinati, ad una frequenza di 60Hz

(9kV/m;20μT) sono state osservate piccole variazioni del battito cardiaco (Cook et al. 1992, Graham et al. 1994). Il battito a riposo è risultato ridotto (3-5 battiti al minuto) durante e immediatamente dopo l'esposizione. Questo risultato non si è presentato per campi più o meno intensi e si è ridotto nel caso in cui i soggetti siano stati mentalmente attenti. Recenti studi volti a dimostrare l'effetto dell'esposizione ai campi elettromagnetici sul livello di melatonina nel sangue sono falliti (Graham et al. 1996, 1997; Selmaoui et al. 1996).

- Studi epidemiologici: riguardano l'incidenza di tumori e di altre malattie croniche e verranno analizzate nel prossimo paragrafo.

3.3.1 Studi epidemiologici

L'epidemiologia studia la distribuzione e i determinanti dello stato di salute nelle popolazioni. L'epidemiologia analitica ha lo scopo di identificare e/o descrivere relazioni tra esposizioni ad agenti (fisici, chimici, biologici) ed effetti sulla salute. I principali metodi si basano su:

- Studi descrittivi
- Studi osservazionali
- Studi sperimentali

Nel 1979 Wertheimer e Leeper pubblicarono una ricerca relativa alla morte di 344 bambini tra il 1946 e il 1973 per leucemia e tumore al cervello nella zona di Denver, in Colorado: in essa si ipotizzava una connessione tra l'insorgenza di neoplasie e la vicinanza delle abitazioni alle linee elettriche. Da allora si sono susseguite molte altre indagini volte a verificare questa correlazione.

Uno studio molto citato a sostegno dell'atteggiamento normativo restrittivo è quello pubblicato nel 1992 da Feychting ed Ahlbom (Stoccolma) che individua una tendenza alla correlazione tra campi magnetici dovuti alle linee elettriche ed un incremento dei casi di leucemia infantile (0-14 anni): riguarda 39 casi complessivi di leucemia infantile nell'arco di 25 anni su una popolazione di circa

450.000 abitanti (i casi complessivi di leucemia comprendenti anche gli adulti per la stessa popolazione e nello stesso arco di tempo sono 364). Inoltre, dall'analisi dei dati dello studio in questione, risulta che l'incidenza dei casi di leucemia infantile causati dagli elettrodotti sarebbe stato di alcuni casi in 25 anni su 450.000 persone. Il numero ridotto dei casi fa comprendere l'errore di valutazione possibile.

Dall'analisi dei maggiori studi epidemiologici condotti fino ad oggi è possibile concludere che c'è una associazione statisticamente significativa tra la vicinanza di abitazioni a linee elettriche e leucemia infantile, ma solo per un piccolo numero di bambini soggetti ad esposizioni caratterizzate da un livello medio di campo magnetico maggiore di 0.3-0.4μT.

Studi che hanno esaminato tumori negli adulti in relazione all'uso di apparecchiature elettriche sono stati largamente negativi. Un gran numero di indagini epidemiologiche si sono occupate di soggetti professionalmente esposti: sebbene sia stato osservato un elevato rischio di cancro per i soggetti esposti a valori di campo molto elevati (lavoratori in centrali di produzione dell'energia elettrica, elettricisti, saldatori....), i tipi di tumore differivano da uno studio all'altro. Inoltre in molti di questi studi non sono stati tenuti in appropriata considerazione i fattori di confondimento, come ad esempio l'esposizione ad agenti chimici presenti negli ambienti di lavoro.

È stato riportato anche un elevato rischio di insorgenza del morbo di Alzheimer in lavoratori soggetti ad alti livelli di esposizione. In generale, però, la mancanza di uniformità dei risultati non permette conclusioni univoche.

Nei confronti dell'esposizione di donne a campi magnetici ELF in ambienti domestici, sono stati condotti studi di diversa natura, legati all'aumento di rischio di tumore alla mammella, di aborto o di malformazione del feto, ma anche qui le evidenze di una qualche correlazione sono poche e contraddittorie.

I limiti di questo tipo di studio sono diversi: molti di essi risultano carenti sul piano della significatività statistica (a causa della

bassissima incidenza delle patologie considerate o per la scelta dei gruppi di piccole dimensioni); sono assai frequenti discordanze nei risultati tra indagini simili; non mancano (anche se sono in minoranza) lavori con risultati completamente negativi; esiste, solo in pochi casi, una relazione dose/risposta; le evidenze di laboratorio sono del tutto insufficienti; non è stato finora possibile suggerire un meccanismo biologico plausibile per spiegare i risultati degli studi.
Perché un'indagine abbia valore, ovvero per accertare l'esistenza di un rapporto causa/effetto tra esposizione e malattia ed eventualmente individuare un valore di soglia, bisogna invece che siano verificate alcune condizioni:

- deve esistere una relazione dose/risposta
- devono aversi dei riscontri di laboratorio
- deve essere identificato un meccanismo biologico plausibile che spieghi i risultati epidemiologici.

Queste condizioni corrispondono in parte ai cosiddetti "criteri di Hill" (1965), che giudicano la qualità di uno studio epidemiologico prendendo appunto in considerazione la significatività statistica, la consistenza tra studi diversi (replicabilità), l'esistenza di una relazione dose/risposta, l'evidenza di laboratorio (esperimenti in vitro e in vivo) e la plausibilità biologica.
Nel settore delle onde elettromagnetiche non ionizzanti si ha quindi certezza scientifica sugli effetti acuti di natura deterministica, dovuti all'esposizione in ogni range di frequenza, ma non si hanno purtroppo dati certi sugli effetti di natura stocastica ed a lungo termine, almeno nel settore delle basse frequenze.
Tutti i dati ottenuti sono raccolti in un database sotto il controllo dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) e dell'Agenzia Nazionale per la Ricerca sul cancro (IARC).
Lo stesso IARC ha classificato i campi ELF quali "possibile cancerogeno", cioè la più bassa delle tre categorie per classificare l'evidenza scientifica dell'associazione tra agente ed insorgenza del cancro.

La posizione dell'OMS, espressa in una conferenza del 2000, è che, pur non essendovi ancora nessuna prova convincente che l'esposizione agli ELF provochi danni al DNA e che quindi possano iniziare il processo di cancerogenesi, può essere comunque giustificabile applicare rigorosi principi precauzionali e adottare sempre misure di sicurezza.

4-Legislazione relativa ai campi ELF

4.1 Generalità

L'aumento delle linee di distribuzione dell'energia elettrica ed il conseguente utilizzo di apparecchi elettrici, sia nelle case che sul lavoro, ha portato ad un incremento dei livelli ambientali di campo elettrico e magnetico. I primi studi relativi ai possibili danni alla salute, derivanti dall'esposizione ai suddetti campi, risalgono alla fine degli anni '70 e dai risultati ottenuti non si escludono possibili rischi per la salute associati a tale fattore. Ogni Stato, tenuto a tutelare la salute dei cittadini, si è posto il problema ed ha emanato una serie di leggi e normative che dovrebbero diminuire il rischio al minimo. Per evitare distorsioni nella corretta interpretazione degli studi effettuati, alcuni dei più importanti organismi internazionali hanno avuto il compito di fornire criteri guida e norme cui il legislatore deve fare riferimento.

4.2 Normativa Internazionale

Nell'ambito della protezione dai possibili danni alla salute derivanti dall'esposizione ai campi elettromagnetici, un punto fondamentale è costituito dai documenti redatti dall'INIRC (International Non-Ionizing Radiation Committee) e dall'IRPA (International Radiation Protection Agency).

L'IRPA-INIRC in collaborazione con l'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) e con l'UNEP (Programma per l'ambiente delle Nazioni Unite), stabilisce, nel 1990, i limiti di esposizione ai campi elettromagnetici.

L'ICNIRP (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection) sostituisce, nel 1992, l'IRPA-INIRC continuando il lavoro di studio dei rischi associati a tutte le differenti forme di campi elettromagnetici.

L'ICNIRP è l'organismo mondiale non governativo che funge da riferimento nel campo della protezione agli effetti delle NIR.

L'ICNIRP raccoglie, valuta e confronta tutti gli studi condotti sui CEM, nei vari paesi, da organismi autonomi e indipendenti tra loro.

4.2.1 Documento dell'ICNIRP

Nel 1998 l'ICNIRP emana le linee guida per l'esposizione ai campi con frequenza da 0 a 300 GHz che, in linea di massima, riconfermano i precedenti documenti, come quello dell'IRPA-INIRC del 1990.

L'obiettivo di questo documento è di ricercare criteri per limitare l'esposizione ai CEM in modo da ottenere la massima protezione contro gli effetti sulla salute umana.

I valori di campo elettrico e di induzione magnetica, ritenuti ammissibili per i campi ELF, si riferiscono per lo più agli effetti acuti o a breve termine, che comprendono la stimolazione delle cellule di tessuti nervosi e muscolari, eccitabili elettricamente. Per quanto riguarda gli effetti a lungo termine, come l'aumento del rischio cancerogeno, l'ICNIRP conclude affermando che gli studi effettuati non danno risultati convincenti.

Le linee guida, basandosi su un'attenta valutazione dei documenti scientifici esistenti, fissano i livelli di esposizione che, se non superati, non comportano alcun effetto negativo immediato sulla salute degli individui esposti. I limiti vengono suddivisi in:

- *Limiti di base:* limitazioni all'esposizione ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici variabili nel tempo che si fondano direttamente su effetti accertati sulla salute e su considerazioni di ordine biologico e vengono espressi tramite grandezze fisiche strettamente correlate agli effetti sanitari;
- *Livelli di riferimento:* sono indicati ai fini pratici di valutazione dell'esposizione in modo da determinare se siano probabili superamenti dei limiti di base. Alcuni sono derivati dai limiti di base attraverso misurazioni e tecniche informatiche, altri si riferiscono alla percezione e agli effetti nocivi indiretti della esposizione. Sono definiti mediante grandezze radiometriche che

caratterizzano l'ambiente esterno e sono facilmente misurabili con una strumentazione adeguata.

Il rispetto di tutti i livelli di riferimento garantisce il rispetto dei limiti di base.

Nella tabella 4.1 sono riportati i limiti di base fissati dall'ICNIRP per quanto concerne le radiazioni non ionizzanti, riferiti ai lavoratori e alla popolazione; la categoria *lavoratori* comprende adulti generalmente a conoscenza dell' esposizione e dei possibili rischi, mentre la categoria *popolazione* comprende individui di ogni età e stato di salute, che possono anche ignorare l'esposizione a cui sono soggetti.

Categoria soggetti esposti	Gamma di frequenza (*f*)	Densità di Corrente testa e tronco [mA/m2]	SAR Mediato Corpo intero [W/Kg]	SAR Localizzato su capo e tronco [W/Kg]	SAR Localizzato sugli arti [W/Kg]	Densità potenza S [W/m^2]
lavoratori	≤ 1 Hz	40	-	-	-	-
	1- 4 Hz	40/f	-	-	-	-
	4 Hz – 1 kHz	10	-	-	-	-
	1 – 100 kHz	f/100	-	-	-	-
	100 kHz – 10 MHz	f/100	0,4	10	20	-
	10 MHz – 10 GHz	-	0,4	10	20	-
	10 – 300 GHz	-	-	-	-	50
popolazione	≤ 1 Hz	8	-	-	-	-
	1 – 4 Hz	8/f	-	-	-	-
	4 Hz 1 kHz	2	-	-	-	-
	1 – 100 kHz	f/500	-	-	-	-
	100kHz – 10 MHz	f/500	0,08	2	4	-
	10 MHz – 10 GHz	-	0,08	2	4	-
	10 – 300 GHz	-	-	-	-	10

Tabella 4.1 – Limiti di base per i lavoratori e la popolazione (ICNIRP 1998)

- Data la non omogeneità elettrica del corpo, le intensità di corrente devono essere calcolate come media su una sezione di 1 cm^2 perpendicolare alla direzione della corrente;
- I valori di SAR devono essere mediati su un qualunque intervallo di 6 minuti;
- Il SAR locale va mediato su una qualunque massa di 10 grammi di tessuto contiguo;
- Il SAR massimo ottenuto in tal modo dovrebbe essere il valore usato per la stima dell'esposizione.

Nella tabella 4.2 sono riportati i limiti di base fissati dall'ICNIRP per quanto concerne l'esposizione dei lavoratori e della popolazione ai CEM variabili nel tempo.

Categoria Soggetti esposti	Gamma di frequenza (f)	Campo elettrico [V/m]	Campo magnetico [A/m]	Induzione magnetica [μT]	Densità di Potenza dell'onda piana equivalente Seq [W/m^2]
Lavoratori	≤ 1 Hz	-	1,63 10^5	2 10^5	-
	1 – 8 Hz	20.000	1,63 $10^5/f^2$	2 $10^5/f^2$	-
	8 – 25 Hz	20.000	2 $10^4/f$	2,5 $10^4/f$	-
	0,025 – 0,82 kHz	500/f	20/f	25/f	-
	0,82 – 65 kHz	610	24,4	30,7	-
	0,065 – 1 MHz	610	1,6/f	2,0/f	-
	1 – 10 MHz	610/f	1,6/f	2,0/f	-
	10 – 400 MHz	61	0,16	0,2	10
	400 – 2000 MHz	$3f^{1/2}$	0,0008 $f^{1/2}$	0,01 $f^{1/2}$	F/40
	2 – 300 GHz	137	0,36	0,45	50
Popolazione	≤ 1 Hz	-	3,2 10^4	4 10^4	-
	1 – 8 Hz	10.000	3,2 $10^4/f^2$	4 $10^4/f^2$	-
	8 – 25 Hz	10.000	4.000/f	5.000/f	-
	0,025 – 0,8 kHz	250/f	4/f	5.000/f	-
	0,8 – 3 kHz	250/f	5	6,25	-
	3 – 150 kHz	87	5	6,25	-
	0,15 – 1 MHz	87	0,73/f	0,92/f	-
	1 – 10 MHz	$87/f^{1/2}$	0,73/f	0,92/f	-
	10 – 400 MHz	28	0,073	0,092	2
	0,4 – 2	1,1375 $f^{1/2}$	0,0037 $f^{1/2}$	0,0046 $f^{1/2}$	f/200
	2 – 300 GHz	61	0,16	0,20	10

Tabella 4.2-Livelli di riferimento per l'esposizione dei lavoratori e della popolazione a campi elettrici e magnetici, valori efficaci di campi non perturbati (ICNIRP 1998)

- se i limiti di base sono rispettati e possono essere esclusi effetti avversi indiretti, i valori di intensità di campo possono essere superati;
- per frequenze comprese tra 100kHz e 10 GHz Seq, E2, H2 e B2 devono essere mediati su un qualsiasi intervallo di 6 minuti;
- nessun valore di campo elettrico è indicato per frequenze <1 Hz, trattandosi praticamente di campi elettrici statici;
- lavoratori: scosse elettriche da sorgenti di bassa impedenza sono prevenute da procedure di sicurezza elettrica stabilite per tali apparati.

4.2.2 Documento CENELEC

Il CENELEC (Comitato Europeo di Normalizzazione Elettronica) attraverso un suo comitato tecnico (TC211), costituito nel 1993, ha emanato una serie di documenti che riguardano gli aspetti elettrotecnici e di misura dei campi elettromagnetici alle varie frequenze.

Nel 1994 è stata approvata, in ambito CENELEC, una norma europea sperimentale per la protezione sia dei lavoratori che della popolazione

dall'influenza diretta e indiretta dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici nella gamma di frequenze da 0Hz a 300 GHz.
La suddetta norma è divisa in due parti: la prima, ENV 50166-1, valuta i campi elettrici e magnetici a bassa frequenza nell'intervallo tra 0 e 10 kHz, mentre la seconda, ENV 50166-2, riguarda i campi ad alta frequenza nell'intervallo tra 10 kHz e 300 GHz.
La tabella 4.3 riporta i soli limiti con riferimento a campi a frequenza industriale (50Hz), poiché sono quelli d'interesse del presente elaborato.

Densità di corrente [mA/m^2]	Campo elettrico [kV/m]	Induzione magnetica [mT]
Lavoratori		
10	30[(a)]	1,6[(b)]
Popolazione		
4	10	0,64
(a) per valori di campo elettrico compresi tra 10 e 30 kV/m la durata massimi di esposizione giornaliera consentita viene stabilita con la seguente formula: $t \leq 80/E$; (b) per condizioni di lavoro particolari e ben definite è prevista la possibilità di accettare esposizioni a campi magnetici fino a 5 mT.		

Tabella 4.3 – Limiti di esposizione ai campi elettrici e magnetici a 50Hz, valori efficaci

4.3 Normativa Comunitaria

Anche l'Unione Europea ha ritenuto di pronunciarsi sul tema della protezione ai CEM ed ha emanato delle leggi basata sul *Principio di Precauzione,* sancito dall'art. 174 del Trattato Istitutivo dell'Unione, che ha come principio la necessità, sia a livello comunitario che nazionale, di intervenire anche in presenza di un rischio potenziale grave, senza attendere i risultati della ricerca scientifica.
L'armonizzazione delle normative nazionali e internazionali è un obiettivo fondamentale perseguito dall'OMS nel quadro del Progetto Internazionale Campi Elettrici cui partecipa anche l'Italia.
Per quel che riguarda la scelta dei livelli minimi di esposizione, il Consiglio dell'Unione Europea ha emanato un'importante raccomandazione del 12 luglio 1999 che si applica in particolare ai luoghi in cui i singoli cittadini permangono per un tempo significativo.

La suddetta raccomandazione accoglie pienamente le linee guida ICNIRP del 1998, adottando la scelta di livelli minimi basati solo sugli effetti accertati e non su quelli potenzialmente cancerogeni.
Nonostante l'Unione Europea raccomandi agli Stati membri di allinearsi a tali limiti, essi hanno comunque facoltà di fornire un livello di protezione più elevato, applicando il principio di precauzione con misure proporzionate agli obiettivi, ad esempio valutando il rapporto tra oneri e vantaggi delle misure assunte.

4.4 Normativa Nazionale

L'Italia, primo tra tutti gli stati europei, al crescere dei timori associati ai possibili effetti cancerogeni dei campi elettromagnetici, ha emanato una specifica disciplina che ne regolamenta l'esposizione.
Il DPCM del 28/04/1992 fissava limiti di esposizione al campo elettrico e magnetico, a frequenza industriale, recependo sostanzialmente quelli dell'IRPA-INIRC.
Il successivo DPCM del 28/09/1995 affermava che, ai fini della prevenzione sanitaria, i limiti sulle intensità dei campi erano prioritari rispetto alle distanze dagli elettrodotti.
Gli interrogativi, tuttora non risolti, circa gli effetti sulla salute dei CEM, non solo hanno diviso il mondo scientifico e della ricerca, ma sul piano politico e giuridico hanno generato confusione per le iniziative, in ambito regionale e locale, che fissavano livelli di protezione sempre più alti, sotto forma di norme delega per la protezione dell'ambiente.
Il Parlamento, allora, ha ritenuto opportuno promulgare una Legge Quadro (22/07/2001) i cui obiettivi di tutela della salute umana sono allargati anche all'ambiente e al paesaggio. Tale legge afferma il principio di univocità dei valori fissati, affidandone la definizione allo Stato, e garantisce la popolazione dai possibili rischi sulla salute del campo di induzione magnetica attraverso tre differenti limiti: limiti di esposizione, valori di attenzione e obiettivi di qualità.

Alla legge quadro ha fatto seguito il DPCM del 08/07/2003 che rappresenta l'attuale riferimento normativo in ambito di esposizione ai campi ELF, i cui limiti sono riportati nella tabella 4.4. i nuovi limiti ricalcano quelli contenuti nelle linee guida dell'ICNIRP ed hanno di fatto negato la legittimità di adottare livelli di protezione più alti.
Almeno nella denominazione ci si riferisce comunque a: *limiti di esposizione, valori di attenzione e obiettivi di qualità.*
Per limiti di esposizione s'intendono i valori massimi a cui la popolazione può essere esposta; i valori di attenzione si applicano come misura di cautela dai possibili effetti a lungo termine nelle aree a rischio (aree di gioco per l'infanzia, ambienti abitativi e scolastici, ambienti che comportino permanenze non inferiori a 4 ore giornaliere); i valori di qualità, fissati in 3 μT nelle zone a rischio appena descritte, cerca di conciliare l'esigenza di minimizzare progressivamente l'esposizione ai campi elettromagnetici con oneri e disagi dovuti ad un risanamento di gran parte degli impianti esistenti.
La stessa legge afferma che le fasce di rispetto per gli elettrodotti dovranno essere determinate facendo riferimento all'obiettivo di qualità di 3 μT, ma la metodologia di calcolo per determinare l'estensione deve essere a tutt'oggi definita, per questo, in attesa di nuove disposizioni, si ritengono ancora valide le distanze fissate dal DPCM del 23/04/1992.

	Campo elettrico	Induzione
Limiti di esposizione	5 kV/m	100 μT
Valori di attenzione	-	10 μT
Obiettivi di qualità	-	3 μT

Tab.4.4 Valori di campo elettrico e induzione magnetica fissati dal DPCM 8/7/2003
Il limite di 10 μT è da intendersi come mediana di valori nell' arco dell'intera Giornata

4.5 Normativa Regionale Emilia - Romagna

Come già accennato precedentemente, prima dell'emanazione della legge quadro n° 36, non essendoci omogeneità nella normativa nazionale, alcune regioni hanno legiferato in materia di elettromagnetismo creando diversità da regione a regione.

Nello specifico la regione Emilia - Romagna ha emanato diversi provvedimenti al fine di fissare i criteri per il rilascio delle concessioni o autorizzazioni e prevenire gli effetti a lungo termine delle NIR.

La L.R.E.R. del 22/02/1993 n° 10 detta le norme per l'esercizio di funzioni amministrative in materia di linee e impianti per il trasporto, la trasformazione e la distribuzione di energia elettrica con tensione fino a 150kV al fine di assicurare:

- la tutela della salute e dell'incolumità della popolazione;
- la compatibilità ambientale e paesaggistica degli impianti;
- il rispetto delle prescrizioni tecniche per la sicurezza e la regolarità dell'esercizio;
- lo snellimento delle procedure per l'autorizzazione di costruzione e di esercizio degli elettrodotti.

Con la L.R.E.R. del 21/04/1999 n° 3 si apportano modifiche alla legge n° 10 citata. Le direttive per l'applicazione della suddetta legge modificata sono sancite dal Dir Reg E.R. del 02/11/1999 n° 1965.

Il 31/10/2000 viene emanata la L.R.E.R. n° 30 che sancisce le norme per la salute e la salvaguardia dell'ambiente dall'inquinamento elettromagnetico.

La delibera del 22/02/2001 n° 197, modificata e semplificata il 17/07/2001, detta le direttive per l'applicazione della legge n° 30 di cui citiamo gli articoli 13, 15 e 16 perché d'interesse ai fini del nostro studio.

Art. 13 *Impianti per la trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica*: i Comuni devono definire negli strumenti urbanistici, in coerenza con il PTCP (Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale), specifici corridoi per la localizzazione delle linee ed impianti elettrici con tensione uguale o superiore ai 150 kV, riferendosi anche ai programmi di sviluppo delle reti di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica, in modo che si realizzi il perseguimento dell'obiettivo di qualità fissato in 0,2 μT di induzione magnetica valutata al recettore in prossimità di asili, scuole, aree verdi

attrezzate ed ospedali nonché edifici adibiti a permanenza non inferiore a 4 ore giornaliere.

Art. 15 *Censimento e catasto delle linee e degli impianti elettrici:* i Comuni adeguano la pianificazione urbanistica individuando le linee e gli impianti in esercizio che superano il valore di 0,5 μT di induzione magnetica misurato al recettore sulla base delle comunicazioni degli enti gestori delle reti di trasmissione e di distribuzione di energia elettrica. L'elenco delle linee e degli impianti individuati viene inviato alla Provincia, dove è istituito il catasto delle linee e degli impianti elettrici con tensione uguale o superiore ai 150 kV.

Art. 16 *Vigilanza:* l'attività di vigilanza e controllo è esercitata dai soggetti titolari della funzione amministrativa del rilascio dell'autorizzazione, ovvero le Province per gli impianti di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica. Per le funzioni sopra richiamate gli Enti si avvalgono dell'ARPA e dell'Azienda Unità Sanitaria Locale, con le modalità previste dall'articolo 17 della L.R. 44/95.

La Regione Emilia - Romagna specifica, attraverso la circolare *AMB/AMB/00/18760* del 9/11/2000, che l'obiettivo di qualità di 0,2 μT d'induzione magnetica rappresenta " un valore da conseguirsi nel breve, medio e lungo periodo al fine di consentire la minimizzazione progressiva dell'intensità e degli effetti, secondo le migliori tecnologie....", esso non può essere quindi definito come un valore limite rispetto al quale bisogna attenersi in ogni situazione, ma è necessario tenere conto delle singole situazioni territoriali, al fine di accordare le esigenze di minimizzare il rischio con quelle di sviluppo territoriale, fermo restando la tutela della salute garantita attraverso il rispetto dei valori limite di cautela e di esposizione.

La determinazione per alcune situazioni territoriali, quali ad esempio la presenza di aree di sviluppo urbanistico in prossimità di impianti esistenti, di un obiettivo di qualità rappresentato da un valore meno restrittivo di 0,2 μT troverà il suo limite ultimo nel rispetto del valore di cautela. Per quanto riguarda tale valore lo Stato si è riservato la

competenza di fissarlo. Oggi con il DPCM 8/7/2003 l'obiettivo di qualità per l'induzione magnetica è fissato a 3 μT.
La regione Emilia - Romagna, ad oggi, non ha ancora recepito i valori fissati dal DPCM 8/7/2003, quindi per il momento valgono i limiti di 0,2 e 0,5 μT di induzione magnetica indicati dalla direttiva del Ministero dell'Ambiente.

5-Misurazione di campi elettrici e magnetici

5.1 Tecniche di misura e strumentazione

Nel corso della nostra analisi abbiamo misurato il campo magnetico generato da elettrodotti e dato che si tratta di campi a frequenza estremamente bassa (50Hz) si possono effettuare le misure dei campi elettrico e magnetico in modo separato, entrambi con una propria strumentazione, che comunque risulta sostanzialmente simile nei due casi.

La valutazione dei livelli dei CEM è una procedura complessa che consta di diverse fasi:

- Analisi delle componenti ambientali inquinanti, in termini di numero,caratteristiche, tensione, corrente, frequenza, tipologia di emissione, regione di campo vicino o lontano. Tutto ciò porta alla scelta degli strumenti e delle tecniche di misura.
- Analisi del sito, con verifica di presenza di oggetti riflettenti o assorbenti il campo incidente, tempo di permanenza degli occupanti, destinazione dei luoghi (siti sensibili, residenza e lavoro) e finalità delle misure.
- Valutazione teorica dell'impatto ambientale provocato dalle sorgenti e previsione, attraverso i modelli di calcolo, dei livelli di esposizione.
- Misure strumentali di campo: una corretta impostazione delle misure strumentali garantisce una valutazione oggettiva delle esposizioni, rappresentando uno strumento fondamentale della valutazione nel suo complesso.

Nel caso delle basse frequenze le misure dei campi vengono eseguite nella regione di campo vicino.

Se le misure sono effettuate all'interno degli edifici bisogna acquisire le planimetrie dell'edificio, l'occupazione dei vano locali, il posizionamento dell'impianto elettrico nonché quello delle varie apparecchiature. Nota la posizione dei vari "elementi" può essere

eseguita un'analisi preliminare per individuare le zone d'interesse, ed in tali zone si procede con le misure strumentali.
Le misure all'aperto vanno eseguite in assenza di precipitazioni atmosferiche, con clima asciutto e temperatura ambientale all'interno dell'intervallo indicata dal costruttore per la strumentazione adottata.
Se le misure sono effettuate al fine di verificare la conformità degli impianti rispetto alle norme vigenti in materia:

- Le rilevazioni devono essere eseguite negli spazi accessibili ai soggetti potenzialmente esposti, ma in assenza di questi. Infatti i limiti di esposizione sono espressi in termini di campi imperturbati.
- Il sito di interesse va suddiviso in reticoli di misura omogenei tra loro; va, per ognuno di questi, eseguito un numero di misure statisticamente significativo; tale numero va scelto in base all'ampiezza della superficie della zona d'interesse ed al numero di persone presenti in essa stabilmente.
- L'area esaminata va poi caratterizzata calcolando i parametri statistici più adeguati (medie e deviazioni) per valutare la massima esposizione possibile delle persone, anche in base all'utilizzo dei calcoli.

La scelta dello strumento deve essere ponderata in base al tipo di indagine da effettuare. Ogni strumento è caratterizzato da una <u>banda passante</u>, ovvero da un intervallo di frequenza entro il quale esso fornisce una risposta affidabile. Prima di effettuare misure di campo è necessario conoscere la banda di frequenza delle sorgenti esaminate e, quindi, scegliere lo strumento.

5.1.1 Strumenti a banda larga e stretta

Gli strumenti usati solitamente sono a banda larga, anche detti broad band. Essi misurano i campi compresi in un ampio intervallo di frequenza, dando in uscita una misura della loro somma; la loro sensibilità non dipende dalla frequenza. Forniscono l'intensità del campo senza dare informazioni sulla frequenza. Essi sono pertanto

indicati per determinare i livelli di campo in un dato ambiente, o al fine di appurare il rispetto di limiti di esposizione. Questi strumenti presentano dimensioni ridotte, semplicità di utilizzo e basso costo (nell'ordine di 5000 €).
Vi sono però situazioni i cui è necessario determinare il contributo al campo globale di una determinata sorgente. In questi casi, occorre utilizzare uno strumento capace di discriminare le singole frequenze, cosiddetto a banda stretta (narrow band). Tali strumenti possono essere sintonizzati su una frequenza, fornendo la corrispondente intensità di campo.
In generale, uno strumento a banda stretta richiede misure più difficili e laboriose di uno a banda larga. Ad oggi sono disponibili strumenti (analizzatori di spettro) che, grazie a sistemi computerizzati interni o accoppiandoli con calcolatori esterni, effettuano automaticamente scansioni di intere bande di frequenza, dando così in uscita il dettaglio dei contributi delle singole frequenze.

5.1.2 Sonde

Le sonde, dette anche sensori,possono essere isotrope o anisotrope. Quelle isotrope (o triassiali) sono formate da tre elementi disposti su tre direzioni ortogonali, tali da poter essere utilizzate in una qualsiasi direzione.
Gli strumenti che utilizzano sonde triassiali misurano contemporaneamente le tre componenti ortogonali del campo; alcuni di essi forniscono il valore delle singole componenti, altri solo la risultante.
Le sonde anisotrope (o monoassiali) rilevano soltanto una componente del campo, lo strumento quindi misura in questo caso il valore d'intensità del campo nella direzione in cui è disposta la sonda. Se si vuole valutare il campo in un posto devono essere eseguite le misure lungo tre direzioni ortogonali; in questo caso possono esserci eventuali errori per campi variabili nel tempo e/o nello spazio, a causa della non contemporaneità delle tre misure. Se il campo è polarizzato

linearmente sono adatte le sonde monoassiali, essendo nota la direzione del campo.
Se il campo ha invece direzione variabile e non nota si deduce che vengono utilizzate sonde isotrope.

5.2 Misure di campi elettrici

Esistono tre tipi di misuratori del campo elettrico:

- Misuratori free-body (a potenziale flottante o a sonda libera)
- Misuratori elettro-ottici
- Misuratori con riferimento potenziale di terra

I primi due sono portabili ed alimentabili con batterie, pertanto sono adatti per le campagne di misura e per le mappature su determinate aree. Nei misuratori free-body il campo elettrico esterno produce, per induzione dielettrica, una distribuzione di carica di segno opposto sulle due armature del condensatore. Quest'ultimo rappresenta il sensore dello strumento, se fra le due armature si realizza un collegamento elettrico, che include il rilevatore, si genera attraverso esso il passaggio di una corrente alternata, la cui intensità è direttamente proporzionale a quella del campo elettrico esterno.
I misuratori elettro-ottici si basano sull'effetto Pockel. Tale effetto consiste nell'induzione, prodotta dal campo elettrico, di una birifrangenza ottica su particolari cristalli, come il bifosfato di potassio.
I misuratori con riferimento al potenziale di terra si usano per determinare l'intensità di campo a livello del suolo o su superfici in tensione che siano piane; il loro funzionamento si basa sull'intensità del campo indotta sulla sonda, che però risulta vincolata al potenziale di terra.
Nelle misurazioni volte alla determinazione del campo elettrico ambientale si misura il campo imperturbato. Le perturbazioni sono prodotte dalla vicinanza di oggetti conduttori, come alberi, recinzioni metalliche o persone, alla sonda. Ciò avviene in virtù del fatto che un corpo conduttore immerso in un campo elettrico crea uno spostamento

di cariche. Questo spostamento genera a sua volta un nuovo campo elettrico, che si sovrappone al primo perturbandolo e quindi alternando la misura.
Per questo motivo è opportuno osservare alcuni accorgimenti per cui l'operatore che esegue le misure deve mantenersi a distanza dal sensore; a tal fine molti strumenti dispongono di un rilevatore separato dalla sonda o di un ripetitore di segnale collegato al sensore da una guida ottica o da un cavo schermato abbastanza lungo.
Inoltre, dato che anche il terreno è un conduttore elettrico, le sonde dovranno essere mantenute ad una certa distanza dal suolo (circa 1,5 metri), tramite un supporto non conduttore (ad esempio un cavalletto di legno).nel caso di misure effettuate su linee elettriche vi sono altri elementi, come le perdite elettriche per effetto dell'umidità o di impurità, oppure la presenza di armoniche della frequenza fondamentale di 50Hz, che possono influenzare la bontà della misura.

5.3 Misure di campi magnetici

Esistono due tipi di misuratori di campo magnetico:

- Misuratori ad induzione (a bobina protetta)
- Misuratori ad effetto Hall

Nei misuratori ad induzione il campo magnetico viene rilevato in funzione della forza elettromotrice indotta su una serie di spire di materiale conduttore immerse nel campo. Per determinare il valore effettivo dell'intensità di campo e la sua direzione, viene ruotata la bobina, opportunamente schermata, fino a rilevare il massimo valore. Il rilevatore è un normale voltometro, per la misurazione della corrente indotta. Questi misuratori hanno dimensioni compatte e sono alimentati a batteria, sono perciò adatti a svolgere misurazioni sul campo.
Nei misuratori ad effetto Hall vi è un semiconduttore percorso da corrente ed immerso in un campo magnetico, nel quale si crea una differenza di potenziale trasversale. Quest'ultima è dovuta alla deviazione delle cariche in moto sotto l'effetto del campo magnetico.

Il valore di campo magnetico ha una variabilità temporale, causata dalle variazioni istantanee delle corrente circolante, ed una variabilità spaziale, che presenta i picchi di massimo valore nelle vicinanze della sorgente.
Le misure di campo magnetico sono meno problematiche da effettuare rispetto a quelle di campo elettrico. In effetti la presenza di qualunque oggetto, purché non ferromagnetico, non influenza il campo, quindi la misura non è alterata nemmeno dall'operatore. A tal proposito sono stati sviluppati degli strumenti chiamati "dosimetri magnetici". Essi sono misuratori di campo magnetico compatti e portatili, che comprendono un sistema di acquisizione dati, che permettono di effettuare automaticamente un alto numero di misure ad intervalli di tempo regolari. Questi misuratori possono essere indossati da un individuo di cui si voglia analizzare la storia espositiva, al fine di valutare gli eventuali effetti biologici. È chiaro che tali strumenti non possono essere usati per misure di campo elettrico, perché il valore misurato sarebbe distorto dall'individuo stesso.

5.4 Tecniche di riduzione di campo

Nonostante la normativa introdotta in Italia nel 1992, in materia di elettrosmog, sia tuttora tra le più restrittive al mondo e anche se la ricerca scientifica non ha confermato, a tutt'oggi, l'esistenza di reali rischi per la salute in seguito all'esposizione ai campi magnetici a frequenza industriale, l'opinione pubblica sembra sempre più allarmata dall'ipotesi di possibili effetti nocivi derivanti da un'esposizione prolungata a bassi livelli di campo magnetico. Al fine di ottenere un'adeguata tutela della popolazione, sono state avviate attività di ricerca mirate allo studio ed al perfezionamento di possibili tecniche di riduzione dei campi magnetici a 50 Hz. In questa sezione verranno esaminati i principali metodi atti a mitigare il campo suddetto.
I metodi a cui si può ricorrere per controllare il campo magnetico generato dalle linee elettriche aeree sono sostanzialmente due:

- la riconfigurazione dello schema dei conduttori
- l'aggiunta di circuiti di compensazione

Per ridurre il campo agendo sullo schema dei conduttori è necessario tener presente che, in un punto qualunque dello spazio, il campo dipende, oltre che dalla corrente, dalla disposizione geometrica dei conduttori, dalla loro distanza, nonché dalla loro distanza reciproca. Ottimizzando la disposizione dei conduttori e compattandoli è stata osservata una riduzione del campo magnetico, rispetto a quello associato ad una linea tradizionale, che non supera il 50% nella zona sottostante la linea, ed un'attenuazione di circa il 30% nelle zone più distanti. Allo scopo di ottenere un'ulteriore mitigazione dei valori di campo magnetico bisogna ricorrere alla soluzione delle fasi sdoppiate, o "*split-phase*". In questo modo una o più fasi vengono suddivise in due o più conduttori, combinando, quindi, l'effetto di cancellazione , legato alla sequenza delle fasi, con la riduzione dell'intensità della corrente circolante nei singoli conduttori. È da notare che la trasformazione di una linea a semplice terna in una doppia terna (con fasi ammezzate e trasposte) realizza una soluzione split-phase, con il vantaggio di poter utilizzare strutture già ingegnerizzate.

Un' altra soluzione si può ottenere installando dei conduttori addizionali, paralleli ai conduttori di linea, e connettendoli in modo tale da creare una o più spire. Il circuito, così realizzato, diventa sede di correnti indotte, che generano a loro volta un campo magnetico; questo campo tende a compensare parzialmente il campo inducente. In pratica, risulta che la corrente indotta nella spira è sempre minore di quella di linea. Per aumentare la corrente indotta e il conseguente effetto schermante è necessaria un'adeguata progettazione della spira. Allo scopo è stato sviluppato dal CESI un software che consente di calcolare il campo magnetico generato dal passaggio di correnti in un sistema di conduttori ed in presenza di altri circuiti di compensazione del campo stesso.

Al fine di valutare l'efficacia di possibili metodi di riduzione dei campi magnetici associabili alle linee a 132-150 kV in cavo

sotterraneo (posti ad una profondità di circa 1,5 m) sono state studiate diverse soluzioni impiantistiche, che possono essere riassunte in quattro metodi fondamentali:

1. variazione della geometria di posa del cavo
2. introduzione di circuiti di compensazione passivi
3. applicazione della tecnica *solid bonding* alle guaine metalliche del cavo
4. aggiunta di schermi metallici.

La tecnica di mitigazione che può essere applicata senza manomettere il cavo, nel caso quest'ultimo sia già posato, con vantaggi sia dal punto di vista tecnico-economico sia ambientale, è la schermatura dei cavi con lastre metalliche. La sperimentazione è stata condotta utilizzando l'alluminio in lastre dello spessore di 5 mm; tali lastre, dal punto di vista dell'efficienza schermante, sono equivalenti a lastre di rame dello spessore di 3 mm. É stato verificato che per ottenere la soluzione ottimale è necessario sagomare gli schermi a forma di U e saldarli tra loro in modo da costituire uno schermo unico. Se il tratto di cavo è, invece, ancora da posare si ottengono buoni risultati, sia dal punto di vista tecnico-economico sia ambientale, con la posa delle tre fasi a trifoglio, anziché la posa in piano con fasi distanziate di 0,25 m. La posa a trifoglio permette, inoltre, una riduzione della larghezza dello scavo e del corridoio di rispetto. Il valore di campo, in questo caso, risulta attenuato oltre il 70%. Un'altra tecnica utilizza la libera circolazione delle correnti negli schermi metallici, qualora questi siano collegati tra loro e a terra all'estremità (solid-bonding). L'utilizzo di materiali ad elevata conducibilità rispetto agli schermi convenzionali determina un aumento del modulo delle correnti negli schermi stessi, che si sottraggono alle correnti che circolano nei rispettivi conduttori di fase, a beneficio della riduzione del campo magnetico. La mitigazione risulta essere dell'ordine di 2-3 volte, tutto ciò però va a scapito di una forte riduzione della capacità di trasporto del sistema, a causa delle perdite che si hanno negli schermi per effetto Joule. Di facile applicazione sono i circuiti di compensazione

(loop passivi), disposti esternamente alla terna. La corrente che circola nel circuito passivo, dotato eventualmente di condensatori di rifasamento, determina una riduzione del campo magnetico.
I soggetti più esposti ai campi emessi da stazioni e da cabine primarie sono i lavoratori ad esse addetti, per ridurre al minimo le loro esposizioni si stanno utilizzando dei sistemi di automatizzazione sia per le stazioni sia per le cabine primarie, ciò proprio per rendere minima la presenza degli operatori in queste strutture. Per quanto riguarda la popolazione residente vicino a queste costruzioni risente dei campi prodotti dai conduttori che arrivano e dipartono da tali strutture, e che dovrebbero essere sostituiti con cavi interrati. Per le cabine secondarie, di trasformazione MT/BT, alcune volte, modificare la posizione dei cavi interni alla cabina, spostandoli dal soffitto al pavimento del locale dove si trova l'impianto,può essere sufficiente a ridurre l'esposizione a dei valori accettabili. Un'ulteriore tecnica utilizzata è la schermatura delle cabine stesse: si possono rivestire le quattro pareti laterali ed il soffitto con pannelli di alluminio, ottenendo un'azione schermante dell'ordine dell'80-90%.

6- MODELLISTICA PREVISIONALE

6.1 Modellizzazione delle linee elettriche

La maggior parte dei modelli previsionali per il calcolo del campo elettrico e dell'induzione magnetica generati da linee elettriche aeree prevede che i conduttori siano assimilati a rette parallele tra loro e al terreno, trascurando l'accentuata concavità della curva assunta dai fili lungo una campata. L'ipotesi rettilinea comporta che i valori in uscita individuino delle linee di isovalore di campo parallele all'asse centrale della campata, risultato questo in contrasto con tutte le verifiche strumentali. Le misure dirette mostrano infatti che l'intensità di induzione magnetica aumenta in corrispondenza del minimo della distanza conduttori-suolo.

Un calcolo affidabile di campo necessita di un'adeguata modellizzazione dei conduttori nelle reali condizioni di posa ed esercizio.

Al fine di analizzare i livelli di campo magnetico generati dagli elettrodotti aerei è necessario conoscere:

1. la corrente circolante
2. il profilo altimetrico della linea
3. la disposizione dei conduttori in corrispondenza ai tralicci
4. le fasi relative ad ogni conduttore
5. la sezione dei conduttori
6. il materiale ed il parametro di posa dei conduttori stessi

Note le caratteristiche elencate, è possibile calcolare lo sviluppo della curva catenaria di ogni singolo conduttore, non necessariamente paralleli tra loro.

Nella manualistica non è raro vedere assimilata la catenaria ad una parabola equivalente. L'equazione generica della catenaria risulta essere

$$z(\xi) = k \cosh\left(\frac{\xi}{C_1} + C_2\right) \tag{6.1.1}$$

dove C_1 e C_2 rappresentano le due costanti d'integrazione che devono essere determinate in base alle coordinate dei punti iniziale e finale della campata, k rappresenta il parametro di tesatura. Consideriamo per semplicità una campata a livello e poniamoci nel sistema di riferimento con coordinate $(x^{'}, z^{'})$ che ha origine nel minimo della curva. Imponendo che

$$\frac{dz_c^{'}(0)}{dx^{'}} = 0 \tag{6.1.2}$$

si ottiene C_1=0, mentre imponendo

$$z_c^{'} = 0 \tag{6.1.3}$$

si ricava C_2=-k

Indipendentemente da dove si trovino i punti di sospensione della catenaria, la sua espressione analitica in questo particolare sistema di riferimento $(x^{'}, z^{'})$ è

$$z_c^{'}(x^{'}) = k\left[\cosh\left(\frac{x^{'}}{k}\right) - 1\right] \tag{6.1.4}$$

Sviluppando l'equazione (6.4) in un intorno di x\k=0 ed arrestandosi al secondo termine si ha:

$$z(x) \cong 2k\left[\left(1 + \frac{1}{2}\frac{x^2}{k^2}\right) - 1\right] = \frac{x^2}{2k} \tag{6.1.5}$$

Se si sceglie come sistema di riferimento (χ, ξ) con origine nel punto di mezzo C della corda che unisce i punti di sospensione P_a, P_b , tali punti avranno in questo sistema di riferimento coordinate P_b=(a,b) e P_a=(-a,-b).Note le coordinate (ξ_a, z_a) e (ξ_b, z_b) dei punti di sospensione nel generico sistema di riferimento si ha che

$$a = \frac{\xi_a - \xi_b}{2} \tag{6.1.6a}$$

$$b = \frac{z_a - z_b}{2} \tag{6.1.6b}$$

Si può ricavare la lunghezza L della catenaria, che risulta essere

$$L(k) = \sqrt{4k^2 \cdot \sinh^2\left(\frac{a}{k}\right) + 4b^2} \tag{6.1.7}$$

sviluppando quest'ultima con b=0 m (campata a livello) in un intorno di a/k=0 si ha

$$L \cong 2k\left[\frac{a}{k} + \frac{1}{6}\left(\frac{a}{k}\right)^3\right] = 2a + \frac{a^3}{3k^2} \tag{6.1.8}$$

Posto che la campata D sia pari a 2a, per campate a livello la freccia massima è data da:

$$f_{\max} = z(a) \cong \frac{a^2}{2k} = \frac{D^2}{8k} \qquad (6.1.9)$$

In un generico sistema di riferimento l'espressione della parabola equivalente alla catenaria risulta essere

$$z(x) = \frac{(x + c_1)^2}{2k} + C_2 \qquad (6.1.10)$$

Per capire l'entità delle approssimazioni introdotte dall'utilizzo della parabola in luogo della catenaria, si riportano in tabella alcuni esempi numerici per quanto riguarda le espressioni della lunghezza della catenaria e della sua freccia massima.

Dati			**Catenaria**		**Parabola a livello**		**Parabola non a livello**	
a (m)	**b (m)**	**k (m)**	**L (m)**	**Fmax (m)**	**ΔL%**	**Δf%**	**ΔL%**	**Δf%**
100	5	500	201.584	10.046	$-1.24 \cdot 10^{-3}$	$-4.56 \cdot 10^{-3}$	$3.24 \cdot 10^{-6}$	$3.3 \cdot 10^{-6}$
100	5	1000	200.583	5.01	$-1.24 \cdot 10^{-3}$	$-2.08 \cdot 10^{-3}$	$3.32 \cdot 10^{-6}$	$8.29 \cdot 10^{-6}$
100	5	2000	200.333	2.504	$-1.25 \cdot 10^{-3}$	$-1.46 \cdot 10^{-3}$	$9.8 \cdot 10^{-7}$	$-2.07 \cdot 10^{-4}$
200	10	2000	401.166	10.021	$-1.24 \cdot 10^{-3}$	$-2.08 \cdot 10^{-3}$	$3.32 \cdot 10^{-6}$	$-8.29 \cdot 10^{-6}$
400	20	2000	805.337	40.183	$-1.24 \cdot 10^{-3}$	$-4.56 \cdot 10^{-3}$	$3.24 \cdot 10^{-6}$	$-3.3 \cdot 10^{-6}$
100	10	500	202.327	10.083	$-4.9 \cdot 10^{-3}$	$-8.22 \cdot 10^{-3}$	$5.22 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
100	20	500	205.271	10.23	$-1.9 \cdot 10^{-2}$	$-2.2 \cdot 10^{-2}$	$2.41 \cdot 10^{-4}$	$-3.1 \cdot 10^{-3}$
100	40	500	216.648	10.798	$-7.1 \cdot 10^{-2}$	$-7.4 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$-2.57 \cdot 10^{-3}$
100	20	1000	204.288	5.103	$-1.9 \cdot 10^{-2}$	$-2 \cdot 10^{-2}$	$6.3 \cdot 10^{-5}$	$-7.8 \cdot 10^{-4}$
100	20	2000	204.043	2.55	$-1.9 \cdot 10^{-2}$	$-2 \cdot 10^{-2}$	$1.56 \cdot 10^{-5}$	$-1.95 \cdot 10^{-4}$

Tabella 6.1-Approssimazioni introdotte dai modelli semplificati

Nella maggior parte dei casi la geometria dei conduttori è tale da generare campi con componente parallela all'asse della linea pressoché nulla, così che è possibile applicare un modello di calcolo bidimensionale estremamente veloce. In alcuni casi, per esempio per campate ad angolo o linee che si intersecano, è necessario un modello di calcolo tridimensionale.

6.1.1 *Schematizzazione della linea*

Si definisce fascia di rispetto lo spazio circostante i conduttori di una linea elettrica aerea, o in cavo interrato, che comprende tutti i punti

caratterizzati da un’induzione magnetica di intensità maggiore o uguale all’obiettivo di qualità di 3 μT, di cui all’articolo 4 del DPCM 8 luglio 2003.

Generalmente nel caso di linee elettriche aeree in conduttori nudi e di cavi interrati unipolari, i conduttori si mantengono tra di loro paralleli. Lo spazio comprendente tutti i punti caratterizzati da un’induzione magnetica di intensità maggiore o uguale ad un determinato valore è assimilabile ad un solido cilindrico la cui sezione trasversale ha forma e dimensioni dipendenti dalla geometria della linea, dall’intensità della corrente e dal valore di induzione magnetica prescelto.

Va sottolineato che, anche per effetto della disposizione dei conduttori lungo una catenaria, la proiezione al suolo del solido cilindrico citato delimita una striscia di terreno che presenta al suo interno zone interessate da valori di induzione magnetica superiori a 3 μT ed aree in cui l’induzione magnetica risulta minore di tale valore. L’approccio migliore sul piano pratico-applicativo è un approccio a due livelli:

- I livello: all’esterno della striscia sopra citata non vengono imposti vincoli di edificabilità in quanto l’obiettivo di qualità 3 μT è sicuramente rispettato
- II livello: all’interno della striscia la concessione all’edificabilità dovrebbe essere subordinata alla dimostrazione del rispetto dell’obiettivo di qualità, e quindi della fascia di rispetto.

Per il calcolo della fascia di rispetto occorre che si conoscano i seguenti dati:

- portata in corrente in servizio normale (dichiarata dal gestore dell’elettrodotto)
- numero e tipologia dei conduttori aerei o dei cavi interrati, loro disposizione relativa e sistema di riferimento rispetto l’asse della linea
- condizioni di fase relativa delle correnti elettriche

La Norma CEI 211-4 del 1996 “Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche” fornisce gli elementi

fondamentali per il calcolo dei livelli di induzione magnetica e di campo elettrico basandosi sulla seguente schematizzazione bidimensionale della linea:

- tutti i conduttori (sia i conduttori di fase sia le funi di guardia) sono considerati rettilinei, orizzontali, di lunghezza infinita e paralleli tra loro
- i conduttori sono considerati di forma cilindrica con diametro costante; nel caso di conduttori a fascio si sostituisce al fascio di subconduttori un unico conduttore di opportuno diametro equivalente
- le altezze da terra e le distanze reciproche dei conduttori sono riferite al centro del conduttore stesso
- il suolo è considerato perfettamente trasparente dal punto di vista magnetico

Inoltre si assume che le correnti di fase (espresse in valore efficace) siano equilibrate e che si possano trascurare le correnti indotte nelle funi di guardia.

Per i cavi interrati le differenze sostanziali rispetto alle linee aeree sono:

- che essi non si dispongono lungo una catenaria, ma si mantengono in pratica sempre paralleli alla superficie del terreno
- che la distanza tra i conduttori è decisamente ridotta

6.2 Legge di Biot e Savart per un filo conduttore

Si consideri un filo conduttore di lunghezza finita L, percorso da corrente alternata. Posto il filo con un estremo nell'origine degli assi del sistema di riferimento, viene scelta come direzione del conduttore quella dell'asse delle x. Per calcolare l'induzione magnetica in un punto P dello spazio, si suddivide il conduttore in elementi di lunghezza dl.

Il contributo di ciascun elemento al campo è dato dalla formula:

$$d\vec{B}_0(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} I(t) \frac{d\vec{l}^{\,'} \times \Delta\vec{r}^{\,'}}{\left|\Delta\vec{r}^{\,'}\right|^3} \tag{6.2}$$

dove $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}^{\,'}$ rappresenta la differenza tra il vettore posizione $\vec{r}$ di P=(x, y, z) e il vettore posizione $\vec{r}$ dell'elemento $d\vec{l}^{\,'}$. Il campo totale si trova sommando i singoli contributi infinitesimi, il che equivale ad un'integrazione lungo il tratto di conduttore considerato di geometria e lunghezza note:

$$\vec{B}_0(r,t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{l'} I(t) \frac{d\vec{l}^{\,'} \times \Delta\vec{r}}{\left|\Delta\vec{r}\right|^3} \tag{6.3}$$

Se la geometria è del tipo indicata in figura

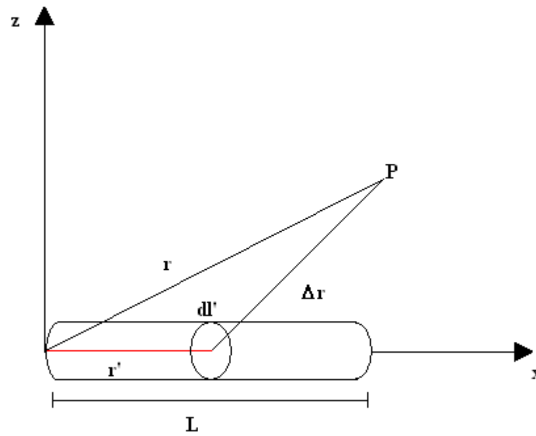


Figura 6.1- Conduttore di lunghezza finita

Allora risulta:

$$\left|\vec{B}_0(x(t), y(t), z(t))\right| = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I(t)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \left[\frac{L - x}{\sqrt{(x-L)^2 + y^2 + z^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right] \tag{6.4}$$

Per le componenti cartesiane dello stesso campo d'induzione magnetica nel punto P nello spazio si ottiene:

$$a) B_x(t) = 0$$

$$b) B_y(t) = \left|\vec{B}_o(t)\right| \frac{-z}{\sqrt{y^2 + z^2}} \tag{6.5}$$

$$c) B_z(t) = \left|\vec{B}_0(t)\right| \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}}$$

I valori ottenuti con le formule (6.5a, b, c) sono istantanei, ossia misurano il campo d'induzione magnetica in un punto dello spazio ad

un dato istante t, inoltre è da precisare che sono valori riferiti ad un conduttore immerso nel vuoto.

Reiterando il calcolo per l'insieme dei segmenti in cui è stato schematizzato il conduttore e per ogni punto di calcolo prescelto, si ottiene il valore dell'induzione magnetica, sovrapponendo vettorialmente gli effetti.

6.2.1 Rototraslazione dei sistemi di riferimento

In questo elaborato si sta trattando con correnti alternate e pertanto l'induzione magnetica **B** risulta composta da una parte reale e da una parte immaginaria. Risulta necessario calcolare le componenti di B in un sistema locale e successivamente riportare le suddette componenti nel sistema primario.

Genericamente si può considerare nello spazio tridimensionale un punto P identificato da un vettore a 4 componenti. La posizione di P è individuata in rapporto ad un sistema di riferimento cartesiano O_0 descritto da 4 versori $\vec{i}_0, \vec{j}_0, \vec{k}_0, \vec{O}_0$. Si definisce $H^{(0)}$ la matrice che descrive una trasformazione, ossia una regola per lo spostamento di tutti i punti nello spazio da una posizione ad un'altra, come

$$H^{(0)} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6.2.1.1}$$

Applicando $H^{(0)}$ ai 4 punti che descrivono O_0 si ottengono i 4 versori del sistema di riferimento trasformato O_1. Tali versori coincidono con i vettori colonna di $H^{(0)}$. Quando $H^{(0)}$ rappresenta una rototraslazione, come nel nostro caso, O_1 risulta essere, come O_0, un riferimento cartesiano ortogonale. È possibile avere trasformazioni combinate successive, prima da O_0 a O_1 (H_{01}) e poi da O_1 a O_2 (H_{12}): la trasformazione complessiva da O_0 a O_2 è descritta da $H_{02}^{(0)} = H_{01}^{(0)} \cdot H_{12}^{(1)}$

Nel nostro caso si può considerare un sistema di riferimento globale nelle coordinate cartesiane (Xg, Yg, Zg). Si consideri inoltre, per ogni elemento in cui viene segmentato il conduttore, un sistema di

riferimento locale, avente origine (Xa, Ya, Za) in un estremo del segmento stesso.

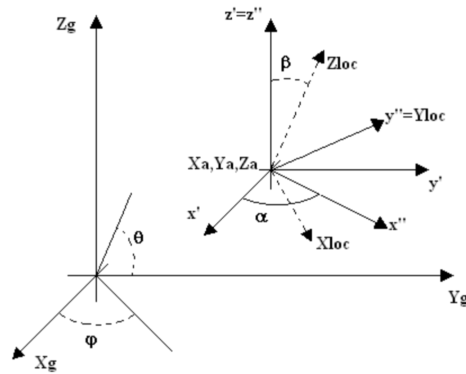


Figura 6.2- Sistema di riferimento globale (Xg,Yg,Zg) e sistema di riferimento locale (Xloc,Yloc,Zloc)

I valori d'induzione magnetica vanno riferiti al sistema di riferimento globale, risulta pertanto necessario implementare le formule di passaggio tra il sistema di riferimento locale e quello globale.

$$\begin{bmatrix} Xloc \\ Yloc \\ Zloc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \sin\alpha\cos\beta & -\sin\beta \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ \cos\alpha\sin\beta & \sin\alpha\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Xg - Xa \\ Yg - Ya \\ Zg - Za \end{bmatrix} \qquad (6.2.1.2)$$

$$rloc = \sqrt{(Xg - Xa)^2 + (Yg - Ya)^2 + (Zg - Za)^2} \qquad (6.2.1.3)$$

In generale i piani individuati da un punto P (§ 6.2) e dai segmenti di conduttore non coincidono e quindi i contributi, Bi, prodotti da ciascun segmento sono sfasati nello spazio. Si calcolano pertanto tramite i versori di ciascun Bi, le componenti spaziali di ciascun Bi, e dalla somma di queste si determina l'induzione magnetica delle due componenti, reale ed immaginaria, della corrente circolante in ciascun segmento. Indicando con I(k) la corrente del k-esimo elemento e con φ(k) la sua fase, si ottiene:

$$a)Bi^{x}_{reale}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I(k)\cos(\varphi(k))}{\sqrt{Y^2_{loc}+Z^2_{loc}}}\left[\frac{X_{i\,loc}-X_{loc}}{\sqrt{(X_{i\,loc}-X_{loc})^2+Y^2_{loc}+Z^2_{loc}}}+\frac{X_{loc}}{\sqrt{X^2_{loc}+Y^2_{loc}+Z^2_{loc}}}\right]$$

$$b)Bi^{x}_{imm}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I(k)\sin(\varphi(k))}{\sqrt{Y^2_{loc}+Z^2_{loc}}}\left[\frac{X_{i\,loc}-X_{loc}}{\sqrt{(X_{i\,loc}-X_{loc})^2+Y^2_{loc}+Z^2_{loc}}}+\frac{X_{loc}}{\sqrt{X^2_{loc}+Y^2_{loc}+Z^2_{loc}}}\right]$$

$$c)Bi^{z}_{reale}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I(k)\cos(\varphi(k))}{\sqrt{X^2_{loc}+Y^2_{loc}}}\left[\frac{Z_{i\,loc}-Z_{loc}}{\sqrt{X^2_{loc}+Y^2_{loc}+(Z_{i\,loc}-Z_{loc})^2}}+\frac{Z_{loc}}{\sqrt{X^2_{loc}+Y^2_{loc}+Z^2_{loc}}}\right] \quad (6.2.1.4)$$

$$d)Bi^{z}_{imm}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I(k)\sin(\varphi(k))}{\sqrt{X^2_{loc}+Y^2_{loc}}}\left[\frac{Z_{i\,loc}-Z_{loc}}{\sqrt{X^2_{loc}+Y^2_{loc}+(Z_{i\,loc}-Z_{loc})^2}}+\frac{Z_{loc}}{\sqrt{X^2_{loc}+Y^2_{loc}+Z^2_{loc}}}\right]$$

la composizione delle quali fornisce il vettore **B** risultante.
Per passare al sistema di riferimento globale basta applicare la matrice inversa di rototraslazione ai vettori di induzione magnetica ottenuti nel sistema locale:

$$\begin{bmatrix}B^x_g\\B^y_g\\B^z_g\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\alpha\cos\beta & \sin\alpha\cos\beta & -\sin\beta\\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0\\ \cos\alpha\sin\beta & \sin\alpha\sin\beta & \cos\beta\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}B^x_{loc}\\B^y_{loc}\\B^z_{loc}\end{bmatrix} \quad (6.2.1.5)$$

Dalla applicazione della (6.2.1.5) si ottengono le seguenti espressioni

$$a)B^x_g=B^x_{loc}\cos\alpha\cos\beta+B^y_{loc}\sin\alpha\sin\beta-B^z_{loc}\sin\beta$$

$$b)B^y_g=-B^x_{loc}\sin\alpha+B^y_{loc}\cos\alpha \quad (6.2.1.6)$$

$$c)B^z_g=B^x_{loc}\cos\alpha\sin\beta+B^y_{loc}\sin\alpha\sin\beta+B^z_{loc}\cos\beta$$

La combinazione delle tre componenti fornisce il vettore induzione magnetica **B** nel sistema di riferimento globale.

6.3 Mappe_ELF

Nell'ambito del lavoro di tesi è stato sviluppato,in collaborazione con il dott. Stefano R. De Donato dell'Arpa di Rimini, utilizzando il linguaggio Visual Basic, il programma Mappe_ELF che calcola solo il campo generato da linee elettriche aeree ed in cavo. Il programma è implementato per 1000 cavi ed è da considerarsi un modello tridimensionale. Nel corso della tesi il programma è stato via via

modificato ed aggiornato fino ad arrivare alla versione di cui si presentano i risultati.

Il modello si basa sull' applicazione della legge di Biot e Savart ai diversi conduttori percorsi da corrente, che vengono approssimati mediante segmenti rettilinei di lunghezza finita. Applicando il principio di sovrapposizione delle cause e degli effetti, l'induzione magnetica in ogni punto viene calcolata come somma vettoriale delle induzioni dovute alle correnti dei vari segmenti rettilinei. Il valore efficace viene quindi determinato come la radice quadrata della somma dei quadrati dei valori efficaci delle componenti spaziali della induzione magnetica.

Il setup comprende:

- *una prima riga* con i dati relativi alle coordinate (x_{inf}, y_{inf}) del punto in basso a sinistra e (x_{sup}, y_{sup}) del punto in alto a destra del rettangolo di valutazione. Sulla stessa riga vanno impostati il passo, l'altezza di stima ed il numero di segmenti in cui suddividere ogni conduttore (quest'ultimo va considerato per i cavi non elicordati, infatti per questi ultimi il programma imposta automaticamente il numero di segmenti dividendo per 8 il passo delle eliche)
- *una riga per ogni conduttore* comprendente
  1. x_{ini}, y_{ini}, z_{ini}: coordinate del conduttore al punto di partenza
  2. z_{min}: altezza del conduttore a metà campata
  3. x_{fine}, y_{fine}, z_{fine}: coordinate del conduttore al punto di arrivo
  4. corrente e fase di ogni conduttore
  5. raggio e passo, che vanno impostati a 0 per cavi non elicordati

Per i cavi elicordati basta dare le coordinate del solo cavo 1, il programma calcola, dal raggio della corda, automaticamente le posizioni dei cavi 2 e 3.

Per poter eseguire il calcolo è necessario preparare il setup con "blocco note", con le modalità descritte.

Esempi di setup:

'singola terna'

0 -10 100 10 0.500 1 20

0 3.5 16 8 100 3.5 16 645 0 0 0

0 -3 18.5 9 100 -3 18.5 645 120 0 0

0 -5 14 7 100 -5 14 645 240 0 0

'cavo elicordato'

-0.2 -0.2 1.2 0.2 0.05 1 1

0 0 0 0 1 0 0 312 0 0.013 1

Fatto ciò è possibile iniziare il calcolo. All'avvio del programma si presenta una finestra con diverse opzioni: *Setup, Esegui, Plot, Esci.*

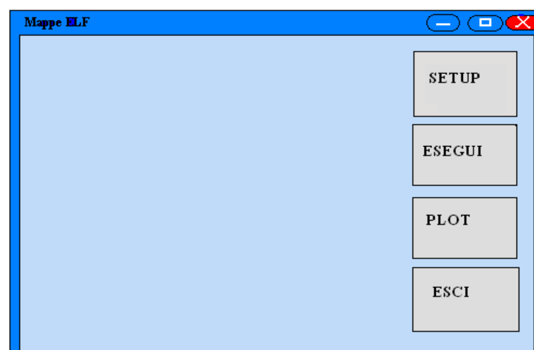


Figura 6.3- Finestra di MappeElf

Per iniziare il calcolo si utilizza il tasto *ESEGUI*, viene chiesto il nome del file da utilizzare per il calcolo ed, in seguito, il nome del file per la memorizzazione dei dati. L'output sarà archiviato, in formato txt, in una cartella Risultati che è stata precedentemente creata, con il nome assegnatogli dall' utente più un numero che si riferisce all' altezza di stima. Tale file può essere analizzato con programmi come Surfer o Arcview Gis.

Il programma segmenta ogni cavo in tanti pezzi, quant'è il numero di segmenti impostato nel setup. L'origine di ogni segmento diventa l'origine del sistema di coordinate, per cui ogni punto dell'area esaminata di coordinate (x, y, z) viene visto con coordinate

$$xx=[(x-a)\cdot cos\alpha +(y-b)\cdot sen\alpha]\cdot cos\beta+(z-c)\cdot sen\beta \qquad (6.3a)$$

$$yy= (x-a)\cdot sen\alpha+(y-b)\cdot cos\alpha \qquad (6.3b)$$

$$zz=[(x-a)\cdot cos\alpha +(y-b)\cdot sen\alpha]\cdot sen\beta+(z-c)\cdot cos\beta \qquad (6.3c)$$

dove: α è l'angolo nel piano xy misurato in senso antiorario, β è l'angolo di inclinazione del segmento misurato in senso antiorario, a, b e c sono le coordinate dell'origine del segmento rispetto al riferimento globale.

Per i cavi elicordati si è fatto riferimento alla struttura mostrata di seguito:

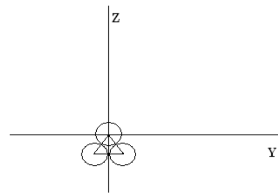


Figura 6.4- Struttura semplificata di un cavo elicordato

il raggio della corda r_c è legato al lato l del triangolo equilatero dalla formula:

$$r_c = \frac{l}{\sqrt{3}} \qquad (6.4)$$

con $l=2r$, r raggio del cavo.

Il cavo 2 ha coordinate $(-\frac{l}{2},-\frac{l}{2}\sqrt{3})$ e fase φ=120°.

Il cavo 3 ha coordinate $(\frac{l}{2},-\frac{l}{2}\sqrt{3})$ e fase φ=240°.

Il cavo 1 forma un'elica, che vista da un sistema di coordinate con origine nel centro del cavo, ha equazione:

$$x = \frac{p\varphi}{2\pi} \qquad (6.5a)$$

$$y=r_c sin(\varphi+90°) \qquad (6.5b)$$

$$z=r_c cos(\varphi+90°)-r_c \qquad (6.5c)$$

Per approssimare la campata si fa riferimento ad una parabola di equazione :

$$z=ax^2+bx+c \qquad (6.6)$$

con
$$a = \frac{2z_{fine} - 4z_{\min} + 2z_{ini}}{x_{fine}^2} \quad (6.7a)$$

$$b = \frac{4z_{\min} - z_{fine} - 3z_{ini}}{x_{fine}} \quad (6.7b)$$

$$c = z_{ini} \quad (6.7c)$$

Le formule utilizzate per il calcolo dell' induzione magnetica sono:

$$B_{xx} = -B_z \sin\beta \cos\alpha + B_y \sin\alpha \quad (6.8a)$$

$$B_{yy} = B_z \sin\alpha \sin\beta + B_y \cos\alpha \quad (6.8b)$$

$$B_{zz} = B_z \cos\beta \quad (6.8c)$$

Si mostra di seguito il diagramma di flusso del programma:

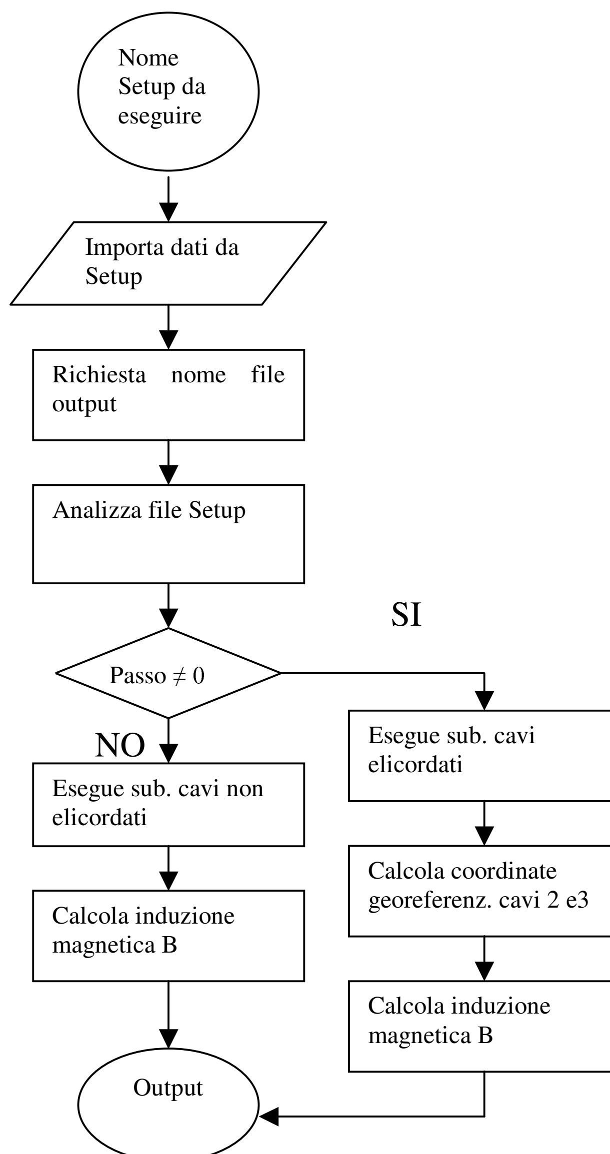


Figura 6.5 – Diagramma di flusso MappeELF

6.4 EFC 400

EFC 400 è un modello di calcolo tridimensionale, commerciale, sviluppato originariamente da Wandel & Goltermann in ambiente Windows e distribuito dalla Narda Safety Test Solutions. Questo programma permette di simulare i campi elettrici e magnetici generati dalle sorgenti elettriche, quali linee aeree, cavi interrati e cabine di trasformazione. EFC 400 consente un' accurata parametrizzazione delle sorgenti suddette. La riproduzione fedele delle stesse si ottiene mediante il controllo di un elevato numero di parametri; è pertanto necessario conoscere con estrema precisione tutti i dati relativi all'elettrodotto.

I dati in input che descrivono le caratteristiche geometriche di una linea aerea sono:

- le coordinate georeferenziate x, y, z di ciascuna torre
- la conoscenza della forma e tipologia del traliccio
- l'altezza massima della torre
- numero e disposizione delle mensole
- estensione orizzontale ed altezza da terra di ciascuna mensola
- numero e disposizioni delle funi di guardia
- le posizioni dei conduttori rispetto alle mensole
- disposizione relativa delle fasi
- diametro dei conduttori o diametro equivalente per i conduttori trinati
- per ogni filo l'altezza minima da terra e la posizione di tale punto lungo una campata

Per quanto riguarda i parametri elettrici si devono specificare:

- potenza e frequenza dei campi cui la linea è sottoposta
- corrente circolante
- composizione dei fili e la loro sezione

Per i cavi interrati bisogna conoscere:

- profondità di ogni conduttore per ogni tratta di linea interrata

- posizione reciproca dei cavi di ogni terna rispetto ad un sistema di assi cartesiani
- passo dell'elica, solo per cavi elicordati
- tensione della linea
- corrente circolante
- diametro dei conduttori o diametro equivalente per conduttori trinati
- resistenza
- disposizione delle fasi

L'induzione magnetica generata da una qualsiasi configurazione è calcolata con la legge di Biot e Savart, attraverso il principio di sovrapposizione delle cause e degli effetti.
L'aspetto più interessante di EFC 400 è la riproduzione della curva assunta dai fili. Il programma approssima la catenaria ad una parabola, suddividendola in un certo numero di segmenti che viene deciso dall'utente. Ognuno dei tratti in cui è suddivisa la parabola è considerato rettilineo. Se si opta per un alto numero di segmentazioni (ad esempio 20) e, specificando l'altezza minima dal terreno di ogni conduttore, si ottiene una curva che riproduce quasi fedelmente quella realmente assunta dai fili.
La complessità del calcolo e la sua durata dipendono da:

1. il numero di segmentazioni per ogni campata
2. dal numero di conduttori (massimo 16000)
3. dall' estensione dell' area di calcolo

Per procedere alla simulazione bisogna scegliere innanzitutto la geometria del problema. Eseguendo il comando File /Geometry e selezionando il modello prescelto si aprono la Construction Window e l'editor di linea. A questo punto si può accedere alle librerie presenti nel programma per selezionare il tipo ed il numero di tralicci o di cavi da inserire nella configurazione. È possibile inserire gli elementi desiderati attraverso la funzione Select. I parametri elettrici della linea possono essere impostati dall'utente: premendo il tasto System Config si accede alla finestra System Configuration, dove si impostano

tensione, corrente, frequenza, fasi, raggio e sezione relativa dei conduttori. La configurazione impostata può essere anche vista in 3D. Con il comando Calculate/Calculation Parameter si fissano i parametri di calcolo:

- il numero di segmenti in cui suddividere ogni conduttore
- il piano, l'area e la quota di simulazione
- il passo del reticolo di simulazione

Per avviare il calcolo del campo si utilizza la funzione Calcolo/Calcolo dell'induzione magnetica, oppure si può utilizzare il tasto indicante B sulla barra degli strumenti.

6.5 Presentazione dei risultati

Dopo una simulazione dal menù View di EFC 400 è possibile scegliere la rappresentazione dei risultati tra:

- *ShowRMS* rappresenta il valore quadratico medio di B o di E
- *Show Peak* rappresenta il valore massimo B_0
- *Show component* rappresenta le componenti B_x, B_y, B_z

I risultati delle simulazioni possono essere presentati in diversi modi:

- *rappresentazione sull'asse x* con la quale si mostra una proiezione dei risultati sull'asse x
- *rappresentazione sull'asse y* con la quale si mostra una proiezione dei risultati sull'asse y
- *rappresentazione sull'asse z* con la quale si mostra una proiezione dei risultati sull'asse z
- *rappresentazione bidimensionale* nella quale viene mostrata una proiezione dei dati nei piani xy, xz o yz; nel piano xy il punto di vista può essere ruotato. L'intensità del campo fra due linee equipotenziali è rappresentata da un dato colore; sono a disposizione 10 livelli di gradazione di colore che possono essere scelti dall'utente
- *rappresentazione con isolinee:* questa rappresentazione dei risultati corrisponde a quella bidimensionale, in questo caso però lo spazio fra due linee equipotenziali non è riempito

- *rappresentazione tridimensionale* nella quale la computazione dei risultati è mostrata come un reticolato sul piano xy

L'EFC 400 consente inoltre di importare piantine e schemi costruttivi in diversi formati (DXF, PCX, JPEG) dal comando Geometry/Import Background Map. Le rappresentazioni dei risultati possono essere esportate nei più usati formati grafici ed in ASCII.

6.6 Modelli di simulazione

I modelli previsionali Mappe ELF ed EFC 400, nel corso del lavoro di tesi svolto in collaborazione con l'ARPA di Rimini, sono stati impiegati per lo studio di sette configurazioni standard. Lo scopo principale di queste simulazioni è quello di mostrare la potenzialità dei codici di calcolo e la confrontabilità degli stessi rispetto alla valutazione dei livelli di campo attesi. Tali simulazioni sono state effettuate all'altezza di un metro dal suolo, con un numero di segmentazioni per conduttore pari a 20 nel caso di linee aeree. I dati sono stati elaborati graficamente con Excel.
Sono di seguito riportati i risultati delle simulazioni effettuate.

6.6.1 Configurazioni standard esaminate

Configurazione A: consta di un elettrodotto a 110 kV composto da una sola campata rettilinea a livello; i riferimenti geometrici relativi alla configurazione sono riportati in tabella 6.1

	X_{in} (m)	Y_{in} (m)	Z_{ini} (m)	X_m (m)	Y_m (m)	Z_m (m)	X_{fine} (m)	Y^{f}_{fine} (m)	Z_{fine} (m)	Raggio (m)	Tensione (V)	Corrente (A)	Fase (°)
Traliccio		1			Metà campata			2					
Conduttore 1	0	-3.5	16	50	-3.5	8	100	-3.5	16	0,010916	110000	645	0
Conduttore 2	0	3	18.5	50	3	9	100	3	18.5	0,010916	110000	645	120
Conduttore 3	0	5	14	50	5	7	100	5	14	0,010916	110000	645	240

Tabella 6.1- Riferimenti geometrici della configurazione A

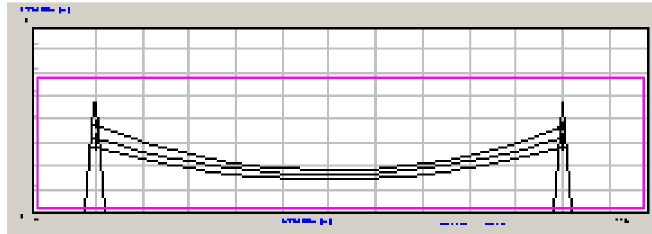


Figura 6.6 Campata a livello – Singola terna

Il grafico 6.1 mostra l'andamento delle distribuzioni dei valori d'induzione magnetica ad una distanza x=50 m, pari alla metà della campata.

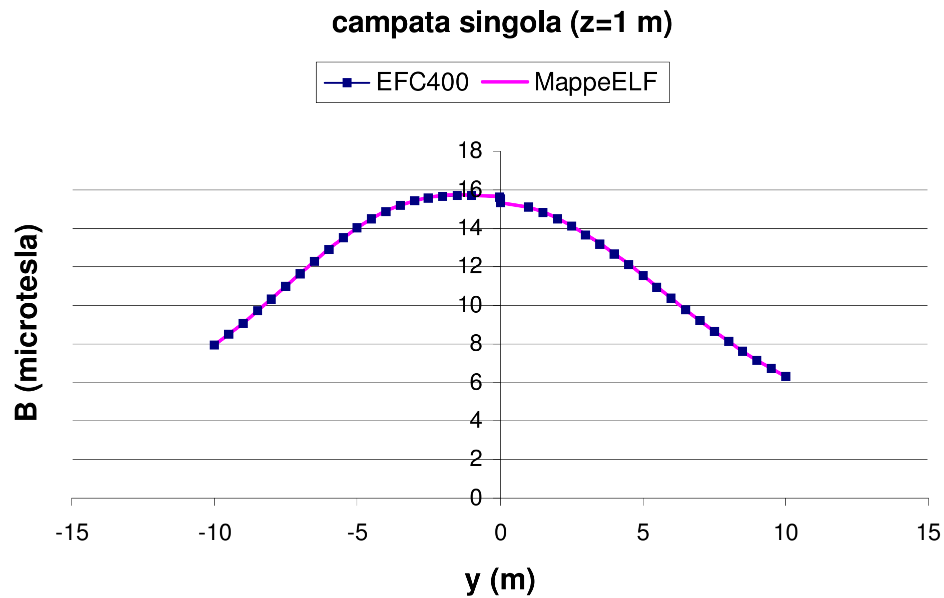


Grafico 6.1- Andamento del campo lungo l'asse Y

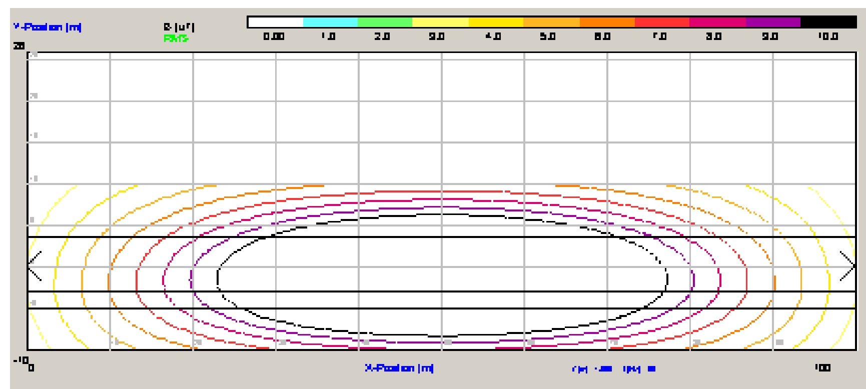


Figura 6.7- Curve di isolivello per la configurazione A

Si è osservato che, come mostrato dal grafico 6.1, i programmi utilizzati forniscono distribuzioni d'induzione magnetica aventi il medesimo andamento. Le stime fornite dai due programmi sono le stesse nell'ordine di 10^{-3} µT. La figura 6.2 mostra le isolinee del campo per la configurazione A ottenute con EFC 400.

Configurazione B: consta di un elettrodotto a 110 kV composto da una sola campata con dislivello di 20 m. Vengono riportati in tabella 6.2 i dati geometrici.

	X_{ini} (m)	**Y_{in} (m)**	**Z_{ini} (m)**	**X_m (m)**	**Y_m (m)**	**Z_m (m)**	**X_{fine} (m)**	**Y_{fine} (m)**	**Z_{fine} (m)**	**Raggio (m)**	**Tensione (V)**	**Corrente (A)**	**Fase (°)**
Traliccio		**1**		**Metà campata**				**2**					
Conduttore 1	0	-3.5	36	50	-3.5	8	100	-3.5	16	0,010916	110000	645	0
Conduttore 2	0	3	38.5	50	3	9	100	3	18.5	0,010916	110000	645	120
Conduttore 3	0	5	34	50	5	7	100	5	14	0,010916	110000	645	240

Tabella 6.2- Riferimenti geometrici della configurazione B

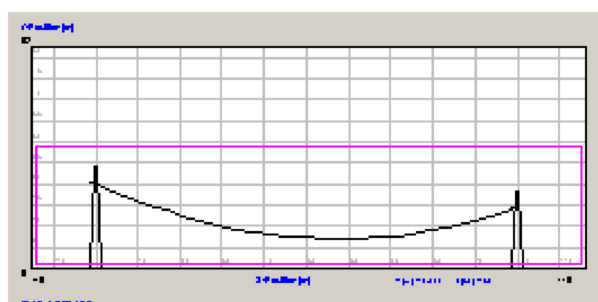


Figura 6.8- Campata a dislivello- Singola terna

Anche per questa configurazione i files di dati ottenuti con MappeELF ed EFC 400 sono stati elaborati con Excel. Si presenta l'andamento delle distribuzioni lungo l'asse y, ad una distanza x=50 m dal traliccio 1 che indica la metà campata, ad una altezza z=1m dal suolo.

I valori stimati dai due programmi sono gli stessi, a meno di un fattore dell'ordine di 10^{-3} µT.

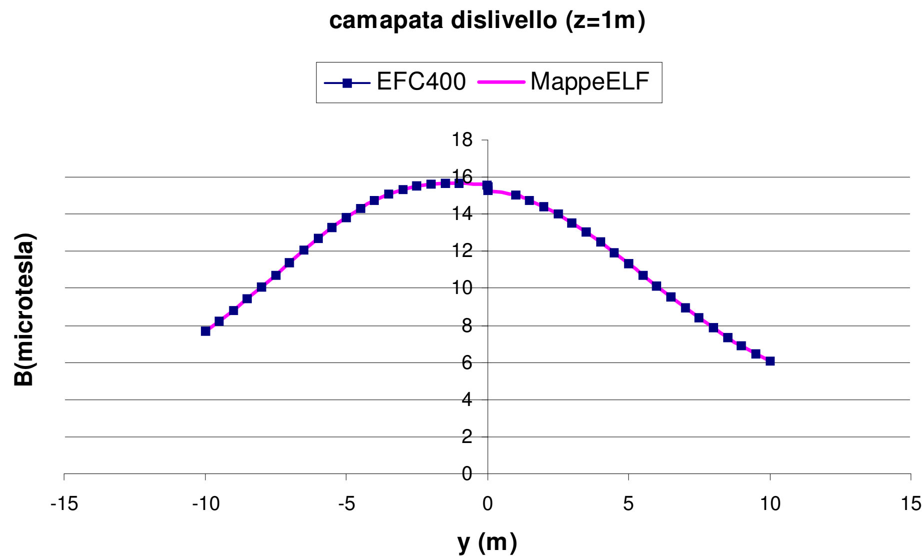


Grafico 6.2- Andamento del campo lungo l'asse Y

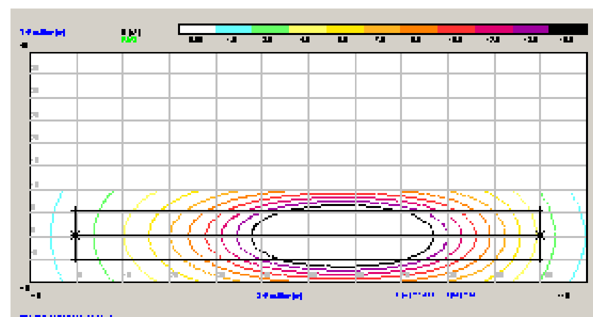


Figura 6.9- Curve di isolivello per la configurazione B

Osservando il grafico 6.2 si evince, anche in questo caso, che i due codici di calcolo forniscono gli stessi risultati, a conferma della loro attendibilità.

La figura 6.9 mostra le curve di isolivello per la configurazione in esame, ottenute con EFC 400. Osservando le curve, si può notare come il campo abbia un'intensità maggiore proprio a distanze prossime alla metà campata, attenuandosi sempre più spostandosi in direzione dei tralicci lungo l'asse x.

Configurazione C: consta di due elettrodotti a 110 kV che si incrociano, formando un angolo di 90°. Si riportano i dati geometrici in tabella 6.3

	Xini (m)	Yini (m)	Zini (m)	Xm (m)	Ym (m)	Zm (m)	Xf (m)	Yf (m)	Zf (m)	Raggio (m)	Tensione (V)	Corrente (A)	Fase (°)
Traliccio		**1**			**Metà campata**			**2**					
Conduttore 1	0	-3.5	16	50	-3.5	8	100	-3.5	16	0.010916	110000	645	0
Conduttore 2	0	3	18.5	50	3	9	100	3	18.5	0.010916	110000	645	120
Conduttore 3	0	5	14	50	5	7	100	5	14	0.010916	110000	645	240
Traliccio		**3**			**Metà campata**			**4**					
Conduttore 1	44.8	50	14	44.8	0	6.5	44.8	-50	14	0.010916	110000	645	0
Conduttore 2	50	50	14	50	0	6.5	50	-50	14	0.010916	110000	645	120
Conduttore 3	55.2	50	14	55.2	0	6.5	55.2	-50	14	0.010916	110000	645	240

Tabella 6.3- Riferimenti geometrici della configurazione C

Per la configurazione C si è scelto di mostrare una rappresentazione tridimensionale della stessa, ottenuta con EFC 400 (figura 6.10).



Figura 6.10- Rappresentazione 3D della configurazione C

Per la geometria in esame si è scelto di mostrare gli andamenti del campo ottenuti con i due programmi utilizzati, ad una distanza x=50 m, elaborando i dati con Excel. Si mostra (fig.6.12) anche, oltre alle curve di isolivello, una rappresentazione 3D del campo stesso dal programma EFC 400, al fine di mostrarne le diverse rappresentazioni possibili offerte da EFC400.

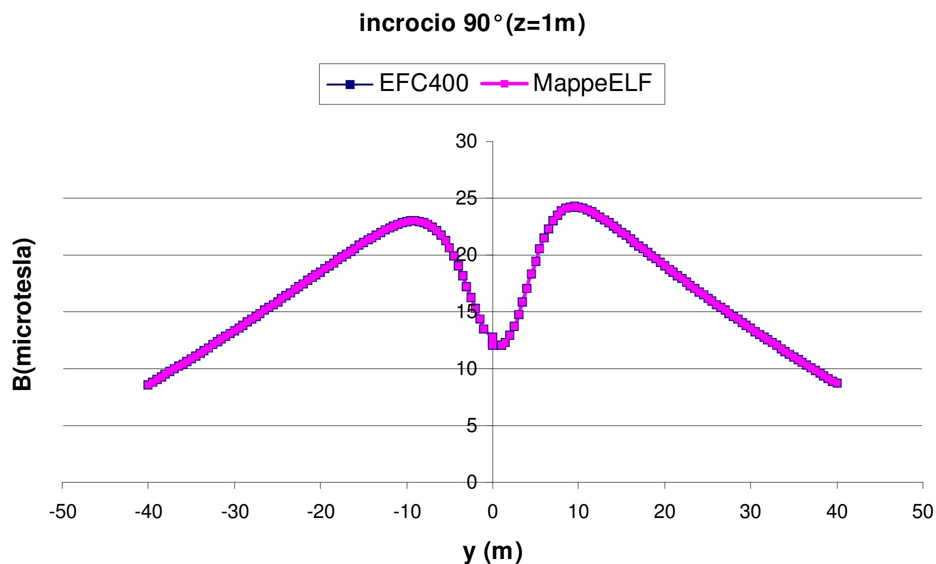


Grafico 6.3- Andamento del campo per la configurazione C

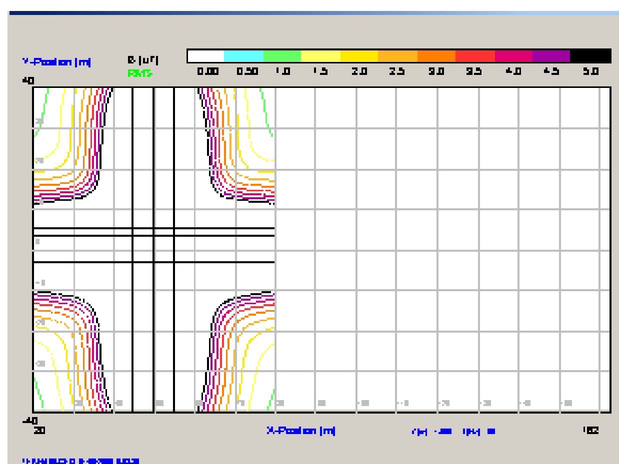


Figura 6.11- Curve di isolivello per la configurazione C

Osservando il grafico 6.3 si ha l' immediata percezione che anche in questo caso i due programmi hanno fornito dei risultati perfettamente consistenti, con $\Delta B=10^{-3}$ µT. Inoltre, osservando le figure 6.11 e 6.12, si può notare come il campo sia elevato immediatamente sotto il punto in cui le due linee si incrociano, attenuandosi sempre più man mano che ci si allontana dalla zona di intersezione.

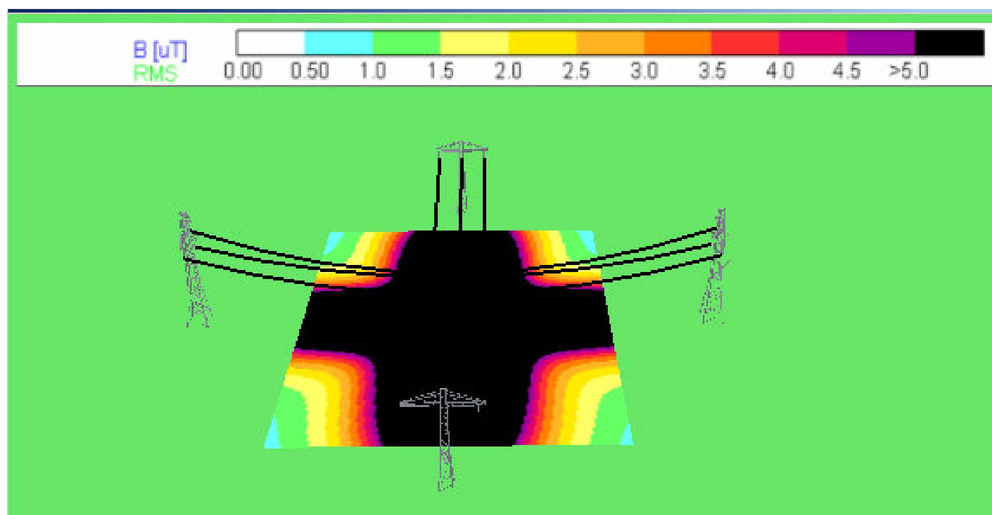


Figura 6.12- Immagine 3D del campo per la configurazione C- EFC 400-

Configurazione D: consta di un elettrodotto a 110 kV composto da due campate parallele poste a 30 m di distanza. I dati geometrici sono riportati nella tabella 6.4.

	Xini (m)	Yini (m)	Zini (m)	Xm (m)	Ym (m)	Zm (m)	Xf (m)	Yf (m)	Zf (m)	Raggio (m)	Tensione (V)	Corrente (A)	Fase (°)
Traliccio		**1**		**Metà campata**				**2**					
Conduttore 1	0	-3.5	16	50	-3.5	8	100	-3.5	16	0.010916	110000	645	0
Conduttore 2	0	3	18.5	50	3	9	100	3	18.5	0.010916	110000	645	120
Conduttore 3	0	5	14	50	5	7	100	5	14	0.010916	110000	645	240
Traliccio		**3**		**Metà campata**				**4**					
Conduttore 1	0	26.5	16	50	26.5	6.5	100	26.5	16	0.010916	110000	645	0
Conduttore 2	0	33	18.5	50	33	6.5	100	33	18.5	0.010916	110000	645	120
Conduttore 3	0	35	14	50	35	6.5	100	35	14	0.010916	110000	645	240

Tabella 6.4 – Riferimenti geometrici della configurazione D

Per la configurazione D si è scelto di mostrare una vista dall'alto della geometria, nonché una rappresentazione tridimensionale della stessa. Le immagini mostrate sono state ottenute con EFC 400.

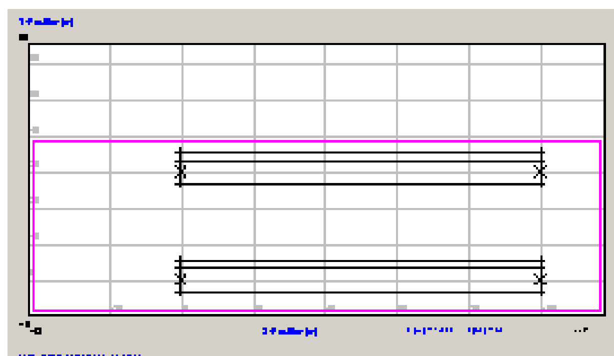


Figura 6.13- Vista dall'alto della configurazione D

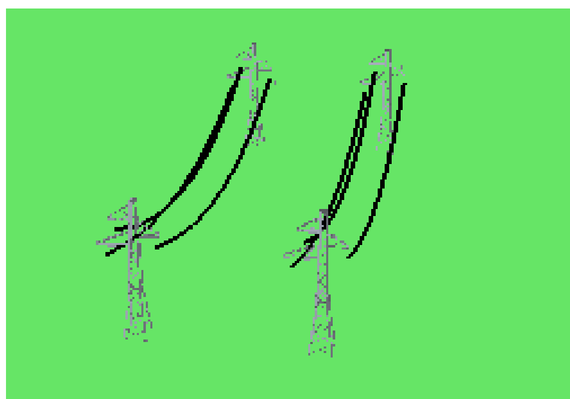


Figura 6.14- Rappresentazione 3D della configurazione D

Il grafico 6.4 mostra l'andamento delle distribuzioni in funzione della distanza sull'asse y, fissata x=50 m. Le simulazioni sono state effettuate ad un'altezza dal suolo pari a z=1 m.

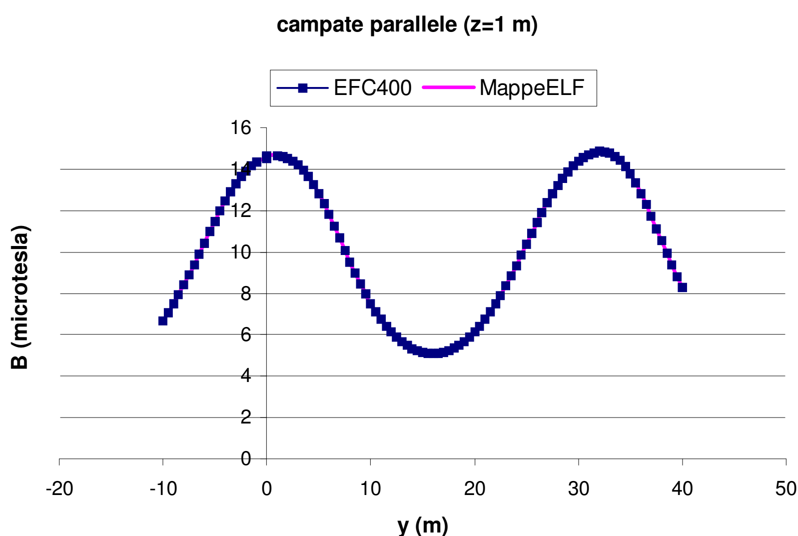


Grafico 6.4- Andamento del campo per la configurazione D

Anche per questa geometria i valori di campo sono stati ottenuti dall'applicazione dei due programmi già citati. Dall'osservazione del grafico si può notare come anche per geometrie "composte" i due programmi forniscano ancora gli stessi risultati, a meno di un fattore dell'ordine di 10^{-3} µT.

Al fine di mostrare la variabilità del campo in funzione della distanza dai tralicci, si mostrano anche in questo caso le isolinee ottenute con EFC 400 (fig. 6.15).

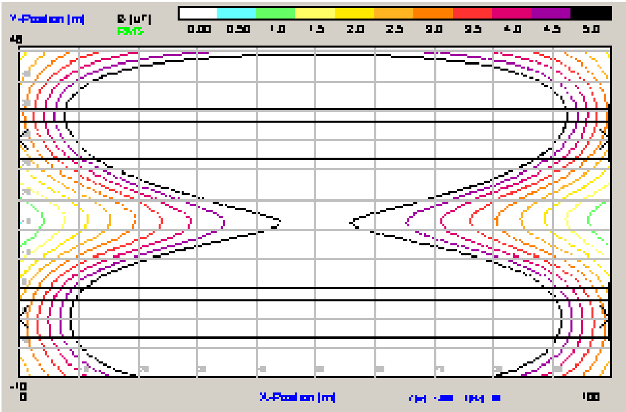


Figura 6.15- Isolinee per la configurazione D

Configurazione E: consta di un elettrodotto composto da due campate ad angolo (45°) a livello. Si è simulato l'andamento del profilo d'induzione magnetica lungo l'asse y, tenendo fissa x (80 m, 100 m, 120m). Si riportano i dati geometrici in tabella 6.5

	Xini (m)	Yini (m)	Zini (m)	Xm (m)	Ym (m)	Zm (m)	Xf (m)	Yf (m)	Zf (m)	Raggio (m)	Tensione (V)	Corrente (A)	Fase (°)
Traliccio	**1**			**Metà campata**			**2**						
Conduttore 1	0	-3.5	16	50	-3.5	8	100	-3.5	16	0.010916	110000	645	0
Conduttore 2	0	3	18.5	50	3	9	100	3	18.5	0.010916	110000	645	120
Conduttore 3	0	5	14	50	5	7	100	5	14	0.010916	110000	645	240
Traliccio	**2**			**Metà campata**			**3**						
Conduttore 1	100	-3.5	16	135.35	35.35	8	170.711	67.211	16	0.010916	110000	645	0
Conduttore 2	100	3	18.5	135.35	35.35	9	170.711	73.711	18.5	0.010916	110000	645	120
Conduttore 3	100	5	14	135.35	35.35	7	170.711	75.711	14	0.010916	110000	645	240

Tabella 6.5- Riferimenti geometrici configurazione E

Si mostrano di seguito i grafici che visualizzano l' andamento dell'induzione magnetica ottenuti elaborando i dati con Excel.

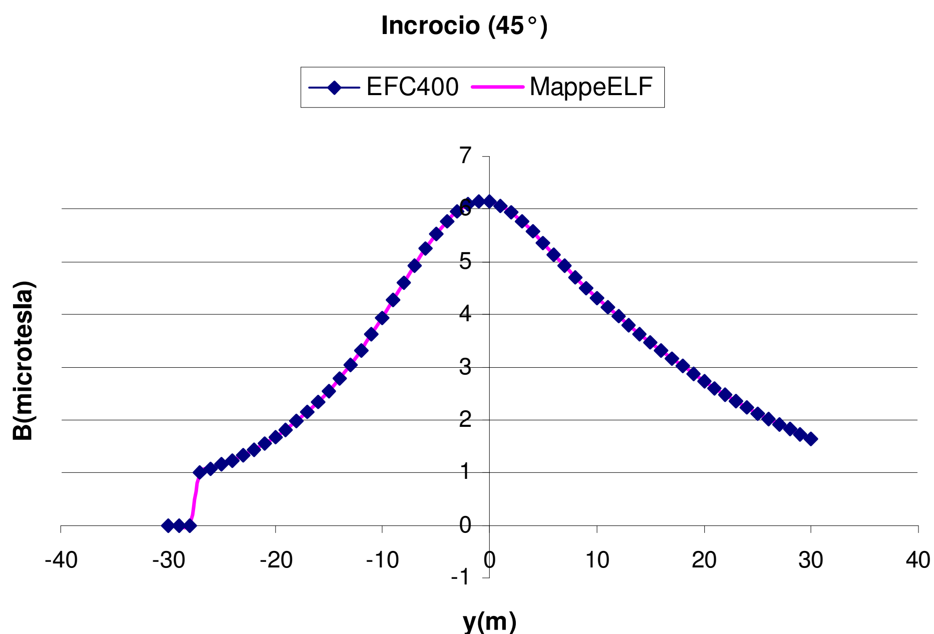


Grafico 6.5- Andamento dell' induzione magnetica- Configurazione E (simulazione a x=100 m)

Ad x=100 m le due campate formano un angolo di 45°.

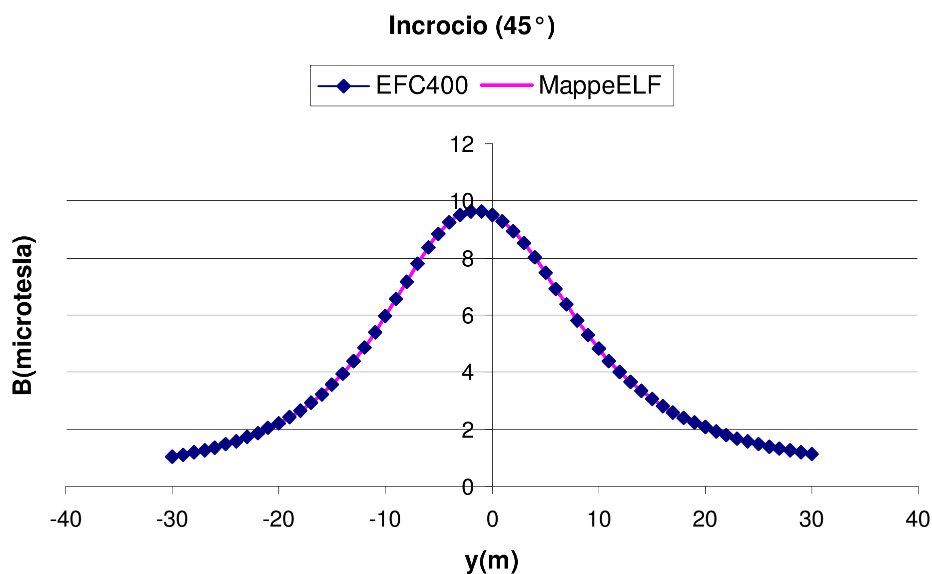


Grafico 6.5- Andamento dell' induzione magnetica- Configurazione E (simulazione a x=80 m)

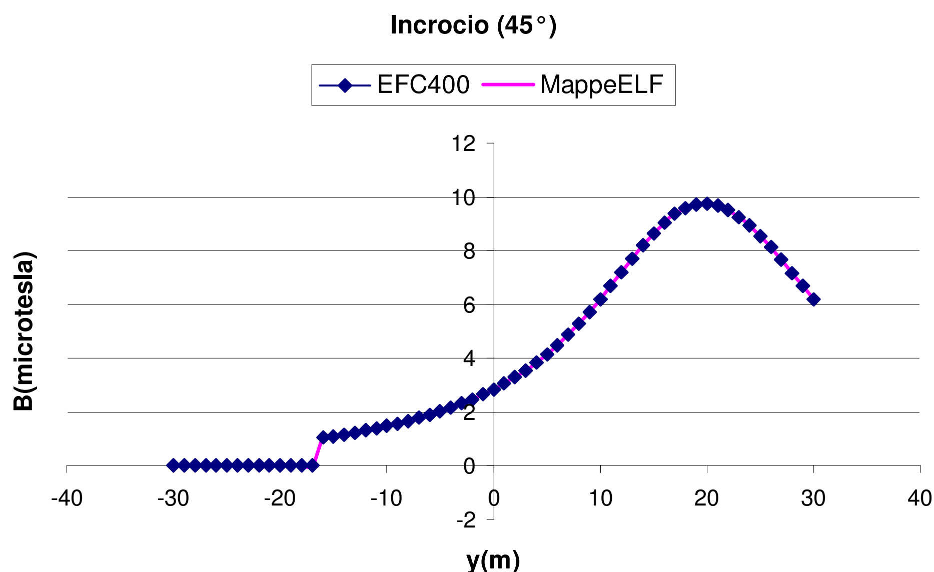


Grafico 6.5- Andamento dell' induzione magnetica- Configurazione E (simulazione a x=120 m)

Anche per la configurazione in esame le simulazioni sono state effettuate ad un'altezza dal suolo pari a z=1m. Si osserva anche in questo caso che i due programmi utilizzati per ricavare i valori d'induzione magnetica hanno fornito gli stessi risultati, con $\Delta B=10^{-3}$. Viene mostrato in figura 6.16 l'andamento del campo ottenuto con il solo EFC400

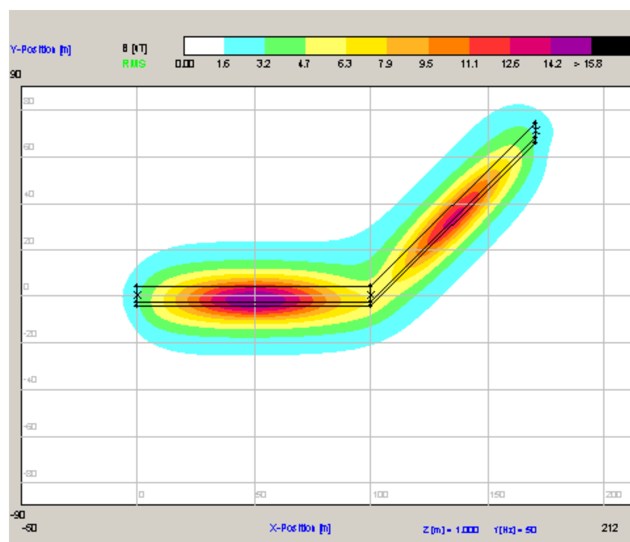


Figura 6.16- Rappresentazione del campo con EFC400

Configurazione F: consta di un cavo non elicordato, lungo 1 m, a 20 kV, di cui si riportano in tabella i dati geometrici.

	X_{ini} (m)	Y_{in} (m)	Z_{ini} (m)	X_{fine} (m)	Y_{fine} (m)	Z_{fine} (m)	Raggio (m)	Tensione (V)	Corrente (A)	Fase (°)
Conduttore 1	0	0	0	1	0	0	0,013174	20000	312	0
Conduttore 2	0	-0.026	0	1	-0.026	0	0,013174	20000	312	120
Conduttore 3	0	-0.013	0.023	1	-0.013	0.023	0,013174	20000	312	240

Tabella 6.6- Riferimenti geometrici per la configurazione F

Per il cavo non elicordato si è scelto di riportare una vista dall' alto dello stesso (fig.6.17). I files ottenuti con MappeELF ed EFC400 sono stati elaborati con Excel. I grafici 6.6 e 6.7 mostrano l' andamento del campo per una distanza x fissa, pari a 0.5 m, al variare della distanza sull'asse y. In questo caso si è scelto di effettuare le simulazioni a z=0m e z=1m.

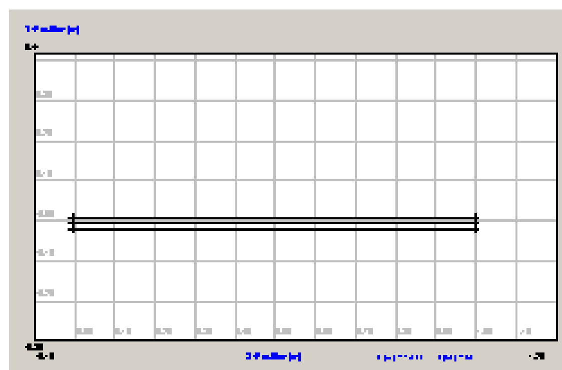


Figura 6.17- Vista dall'alto di un cavo non elicordato

I grafici mostrano i due programmi diano lo stesso andamento di campo, $B_{EFC400}=B_{Mappe}\pm10^{-3}\mu T$; tutto ciò a riprova della compatibilità dei due codici di calcolo. Si è scelto di mostrare nelle figure 6.18 e 6.19 anche la rappresentazione del campo ottenuta con EFC 400, nonché le isolinee di campo al fine di mostrare il completo andamento del campo stesso.

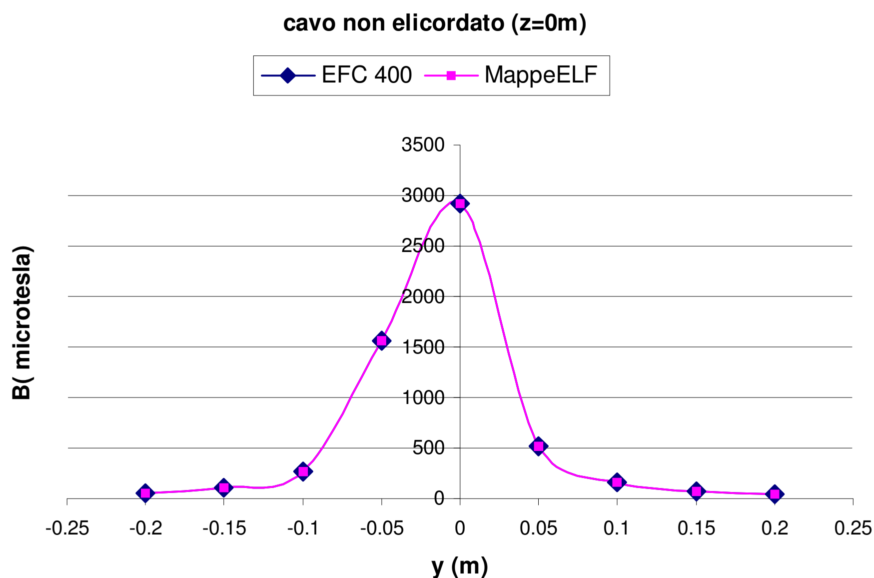


Grafico 6.6- Andamento del campo per la configurazione F a z=0 m

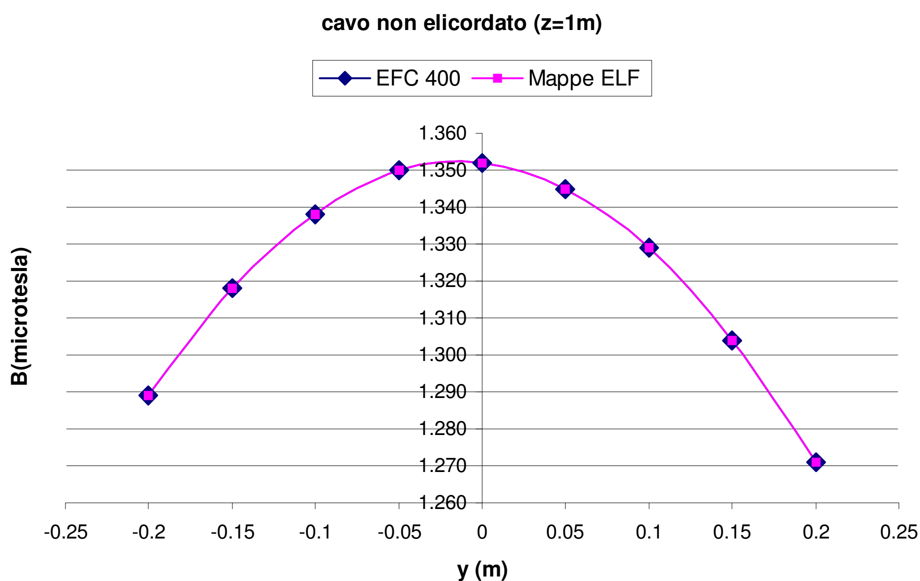


Grafico 6.7- Andamento del campo per la configurazione F a z=1 m

È da notare come i valori d’induzione magnetica varino in funzione di z. Allontanandosi dal cavo i valori di campo risultano estremamente attenuati.

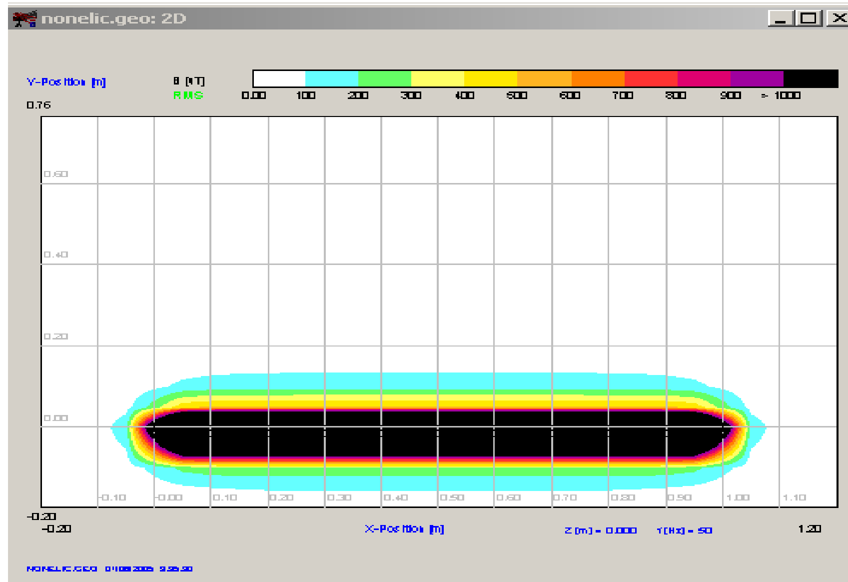


Figura 6.18- Andamento del campo per la configurazione F (z=0m)

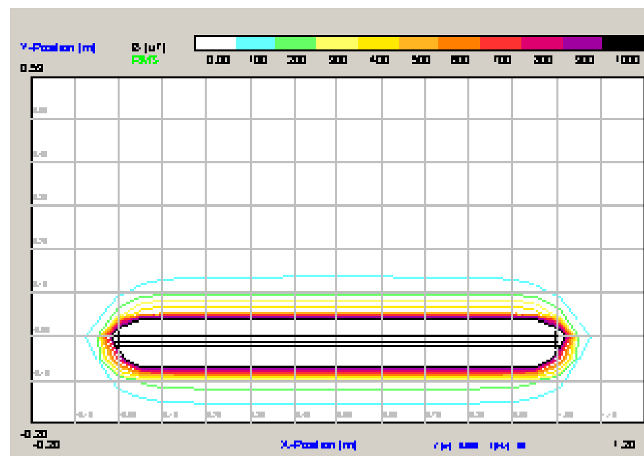


Figura 6.19- Isolinee per la configurazione F

Osservando le figure 6.18 e 6.19 si evince che il campo si attenua, oltre che dall'aumentare della distanza dal cavo in z come visto in precedenza, anche in funzione di x e y, come è naturale che sia.

Configurazione G: consta di un cavo elicordato, lungo 1 m, con elica pari a 1m, a 20 kV, di cui si riportano in tabella 6.7 le caratteristiche.

	X_{ini} (m)	Y_{in} (m)	Z_{ini} (m)	X_{fine} (m)	Y_{fine} (m)	Z_{fine} (m)	Raggio (m)	Tensione (V)	Corrente (A)	Fase (°)
Conduttore 1	0	0	0	1	0	0	0,013174	20000	312	0
Conduttore 2	0	-0.026	0	1	-0.026	0	0,013174	20000	312	120
Conduttore 3	0	-0.013	0.023	1	-0.013	0.023	0,013174	20000	312	240

Tabella 6.7- Riferimenti geometrici per la configurazione G

Per la configurazione in esame si è scelto di mostrare la schematizzazione del cavo sul piano xy con EFC400

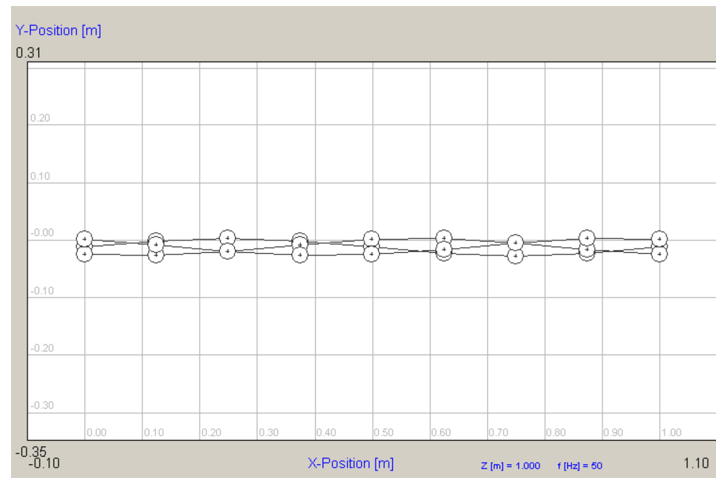


Figura 6.20-Vista laterale di un cavo elicordato

Anche in questo caso i valori di campo ottenuti mediante l'utilizzo dei due programmi esaminati sono stati elaborati con Excel (grafici 6.8 e 6.9).

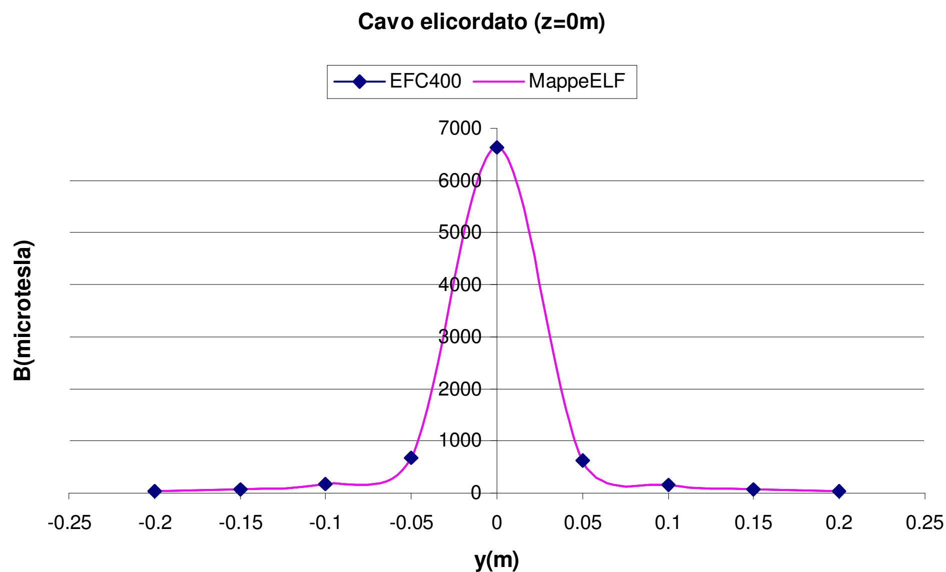


Grafico 6.8-Andamento de campo ad x=0.6m per un cavo elicordato

Per il cavo elicordato si è scelto inoltre di effettuare una simulazione considerando l'ipotesi il cavo stesso fosse inclinato di 0,5 m, come nel caso, ad esempio, di linee interrate in condizioni di suolo non pianeggiante. I risultati ottenuti in questo caso sono mostrati nel grafico 6.9

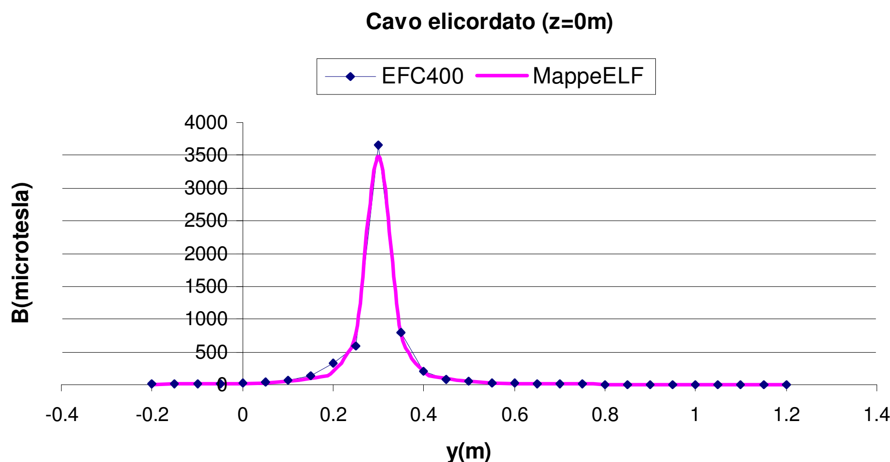


Grafico 6.9-Andamento del campo ad x=0.6m per un cavo elicordato inclinato

Dal grafico appena visto si può notare che i due programmi forniscono distribuzioni delle stime d'induzione magnetica non perfettamente coincidenti. La ragione di ciò risiede nel fatto che i due programmi operano una diversa segmentazione del cavo. Mentre MappeELF colloca il cavo nelle coordinate assegnategli da setup, EFC opera nel posizionamento del cavo stesso una sorta di rettificazione. Si mostra di seguito una figura dei due diversi comportamenti a scopo esplicativo

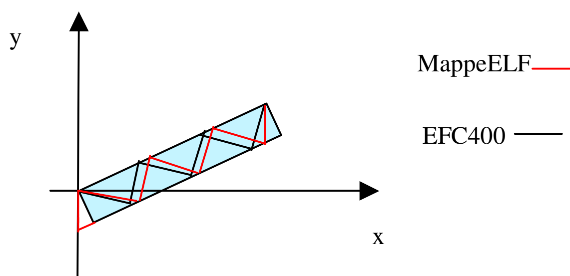


Figura 6.21- Schematizzazione della segmentazione di un cavo elicordato con MappeELF ed EFC400

Ciò nonostante si può affermare che, comunque, i risultati ottenuti dalle due simulazioni con EFC400 e MappeELF sono compatibili, nell'ordine del 3% circa.

6.7 Nozioni di Arcview-Gis

Il sistema informativo geografico (GIS) è un insieme di strumenti informatici concepito per descrivere ed analizzare elementi, eventi e fenomeni inerenti la superficie terrestre. Il GIS consente di creare mappe, integrare informazioni, visualizzare scenari, risolvere complessi problemi e sviluppare effettive soluzioni esprimibili sia in forma cartografica che nella forma quali-quantitativa. Il GIS lavora con due fondamentali tipi di modelli geografici: il modello vettoriale ed il modello raster. Nel modello vettoriale le informazioni di punti, linee, poligoni, sono codificate e memorizzate come collezione di coordinate x, y. Il modello raster è stato sviluppato per gli elementi continui ed è costituito da un insieme di celle regolari rappresentanti ciascuna uno specifico valore. Per essere utilizzati all'interno del Gis i dati devono essere rappresentati in formato digitale.

Arcview, software commercializzato dalla ESRI (Enviroment Systems Research Institute), è uno di questi prodotti. Il programma lavora con informazioni georeferenziate, correlando biunivocamente elementi grafici (features). Ogni feature è un oggetto di tipo CAD e viene disegnato con elementi quali poligoni, linee e punti. Si possono creare mappe geografiche dove, oltre agli elementi umani e naturali realmente presenti, compaiono linee e fasce che individuano zone dalle particolari caratteristiche.

La particolarità più interessante di Arcview consiste nel fatto che i punti rappresentati in ogni mappa sono georeferenziati, ad ognuno di essi corrisponde un preciso punto sulla superficie terrestre.

Una mappa cartacea o digitale rappresenta uno spazio disteso su una superficie piana bidimensionale con al massimo l'opportunità di distinguere le quote rispetto al terreno. Il modo in cui i punti sulla superficie della terra vengono associati con quelli su tale superficie piana è l'aspetto cruciale nella realizzazione di ogni cartografia. Esistono vari tipi di proiezioni geografiche che permettono di ridurre al minimo le deformazioni nel passaggio della reale superficie terrestre a quella rappresentata dalla carta.

Il sistema cartografico italiano utilizza una proiezione detta di Gauss-Boaga, nell’elaborazione digitale delle mappe è importante che il software la riconosca altrimenti i punti rappresentati sono distorti da quelli reali.
Come detto nel paragrafo 6.3, i file ottenuti mediante l’uso di MappeELF possono essere elaborati con programmi come Arcview-Gis. In riferimento a ciò si è scelto di mostrare tale applicazione utilizzando il file ottenuto considerando un incroci tra due campate.
La mappa così ottenuta viene mostrata in figura 6.22. Sono stati evidenziati con diverse tonalità di colore i diversi valori di induzione magnetica (10 μT, 5 μT, 3 μT, 0.5 μT, 0.2 μT).



Figura 6.22- Immagine ottenuta dall’elaborazione con Arcview GIS

7- CONFIGURAZIONI SPERIMENTALI

7.1 Linea elettrica aerea reale

Dopo aver accertato la validità dei modelli esaminati nel presente elaborato, si è proceduto alla simulazione di un caso reale.

A tal fine è stata scelta la linea Forlì Oraziana – Fano a 380 kV (linea n° 350) e nello specifico il tratto di tale linea avente come estremi i tralicci n° 135 e 136, che attraversa via S. Salvatore nel Comune di Rimini. L'ente gestore è la società Terna di ENEL. Il tratto di linea esaminato si estende per una lunghezza di 387 m. La campata è rappresentata da una singola terna in dislivello. Nel complesso la linea è realizzata da 9 conduttori, trinati per ogni fase, costituti da alluminio ed acciaio di diametro pari a 31,5 mm.

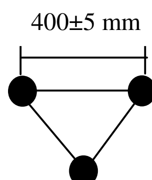


Figura 7.1 – Geometria e dimensioni in mm dei conduttori

Si riportano in tabella 7.1 ulteriori dati relativi alla campata in esame

	Xini (m)	Yini (m)	Zini (m)	Zm (m)	Xf (m)	Yf (m)	Zf (m)	Tensione (kV)	Corrente nominale (A)	Fase (°)
Traliccio		**135**		**Metà campata**		**136**				
Conduttore 1	0	-8.8	27	21.45	387	-7.4	36	380	1500	0
Conduttore 2	0	0	27.95	22.2	387	0	36.95	380	1500	120
Conduttore 3	0	8.8	27	21.45	387	7.4	36	380	1500	240

Tabella 7.1 – Dati geometrici della linea n°350

Per la linea n° 350 è stata operata una simulazione con MappeELF, al fine di verificare la validità del programma anche in casi realmente esistenti. I valori di corrente inseriti nel programma sono quelli forniti da Enel. Per le simulazioni sono stati scelti intervalli di ogni ora, in riferimento alle misurazioni che sono state effettuate. I risultati ottenuti sono mostrati di seguito nel grafico 7.1

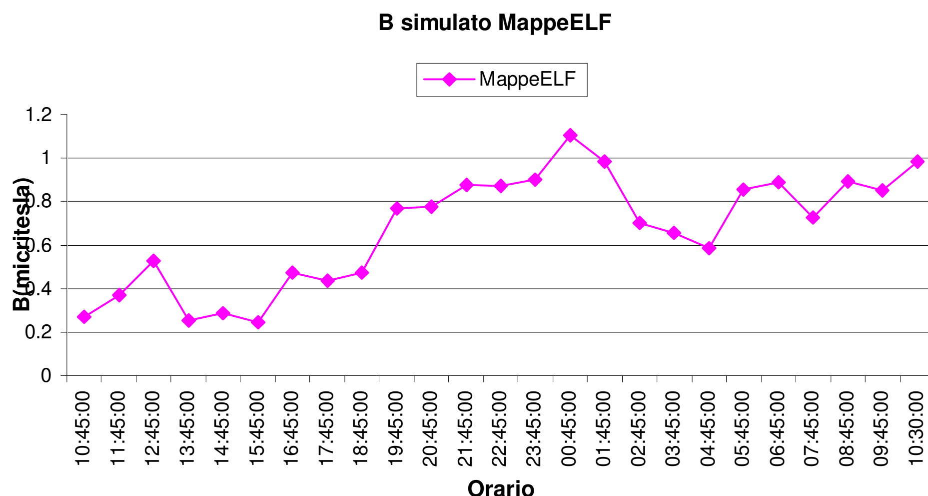


Grafico 7.1- Andamento dei valori d'induzione magnetica simulati

I dati ottenuti sono poi stati confrontati con i valori d'induzione magnetica che sono stati rilevati sul campo.

Il file della simulazione della linea esaminata ottenuto con MappeELF è stato analizzato con il programma Arcview.

Di seguito viene mostrata la mappa così ottenuta (fig.7.2). Sono state evidenziate le isolinee di 5 μT, 3 μT, 1 μT, 0.5 μT, 0.2 μT e rappresentate in mappa mediante cromatismi differenziati. Andando dall'interno verso l'esterno della figura che mostra la distribuzione dei valori di induzione magnetica si hanno le rappresentazioni delle fasce scelte in ordine decrescente. Il valore di 5 μT corrisponde, nella zona al di sotto della linea, alla parte più interna dell'immagine, quella di 0.2 μT è quella corrispondente alla fascia più esterna dell'immagine.

In prossimità del traliccio n°135, in via S. Salvatore è posto un edificio di altezza totale pari a 9.44 m, formato da due piani, per il quale la distanza orizzontale da proiezione conduttore - immobile è stata stimata pari a 15,33 m.



Figura 7.2- Immagine della distribuzione di valori d'induzione magnetica Linea n° 350- Arcview GIS

I rilievi d'induzione magnetica sono stati condotti all'interno di uno degli appartamenti siti al primo piano dell' edificio suddetto.

Le modalità di misura hanno seguito generalmente quanto indicato dalla Norma CEI 211-6.

Si è provveduto inizialmente, attraverso misure di breve durata eseguite ad un metro di altezza dal pavimento, all'identificazione del punto in cui si registrava il valore massimo d'induzione magnetica. In tale punto sono state eseguite misure in continuo sulle 24 ore. Durante le 24 ore di misura la strumentazione acquisiva un valore di induzione magnetica ogni cinque minuti.

Lo strumento utilizzato è un misuratore di campo magnetico isotropico per bassa frequenza EMDEX II, con le seguenti caratteristiche:

Campo di lavoro	0.01÷300 (μT)
Intervallo di frequenza	40Hz÷800Hz
Incertezza di misura	10%
Data di calibrazione	03/05/2005

Tabella 7.2 Caratteristiche EMDEX II

La strumentazione utilizzata fornisce direttamente il valore efficace del campo magnetico rilevando contemporaneamente le tre componenti del campo.

Il grafico 7.2 mostrato di seguito rappresenta la distribuzione dei valori di induzione magnetica misurati a intervalli di 5 minuti. Inoltre nello stesso grafico sono rappresentati i valori dell'induzione magnetica corrispondenti ad ogni inizio ora e ad intervalli di 15 minuti.

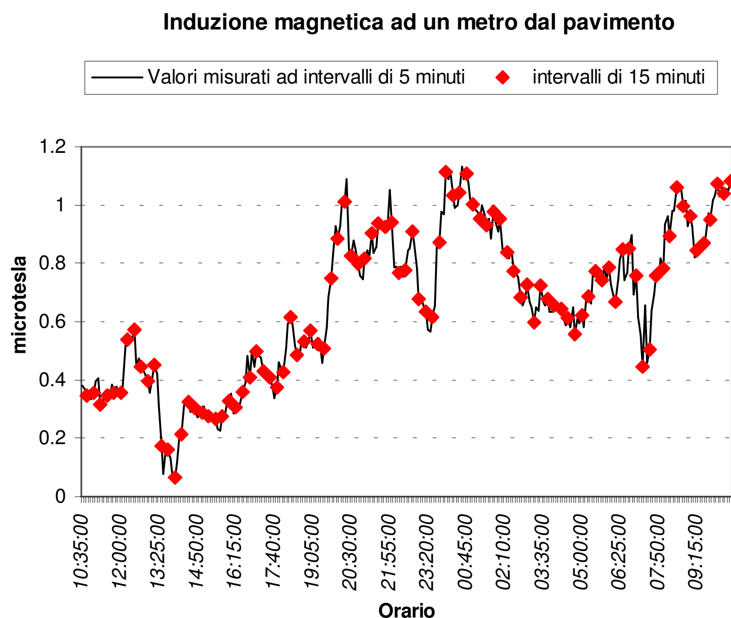


Grafico 7.2- Induzione magnetica misurata ad un metro dal pavimento

Nel grafico 7.3 sono invece riportati gli andamenti dell'induzione magnetica e dell'intensità di corrente circolante nell'elettrodotto a 380 kV. I rilievi sono stati eseguiti ad intervalli di 15 minuti, nelle 24 ore.

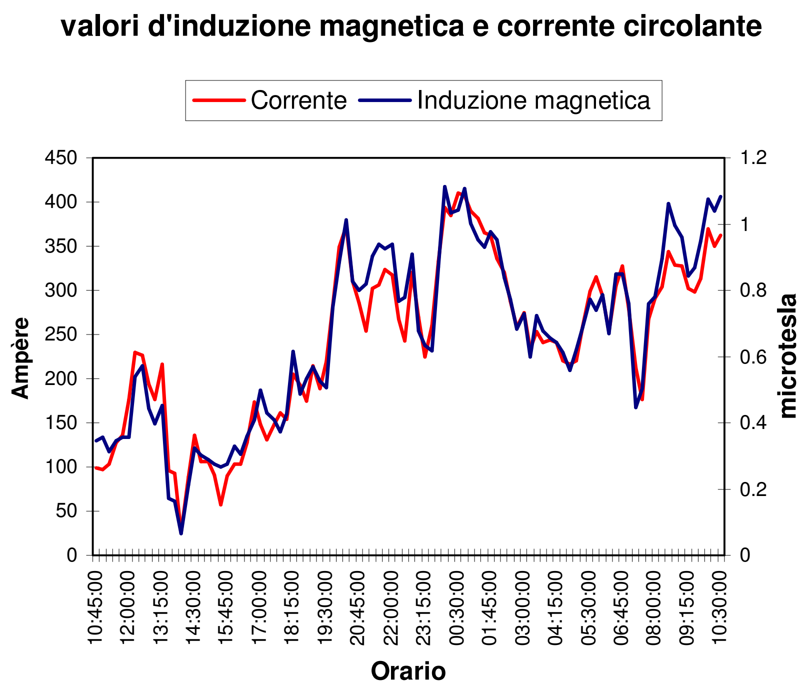


Grafico 7.3- Induzione magnetica e corrente circolante

Il grafico 7.4 mostra gli andamenti delle stime dei valori d'induzione magnetica simulati e misurati, allo scopo di dare una valutazione qualitativa della corrispondenza dei due andamenti.

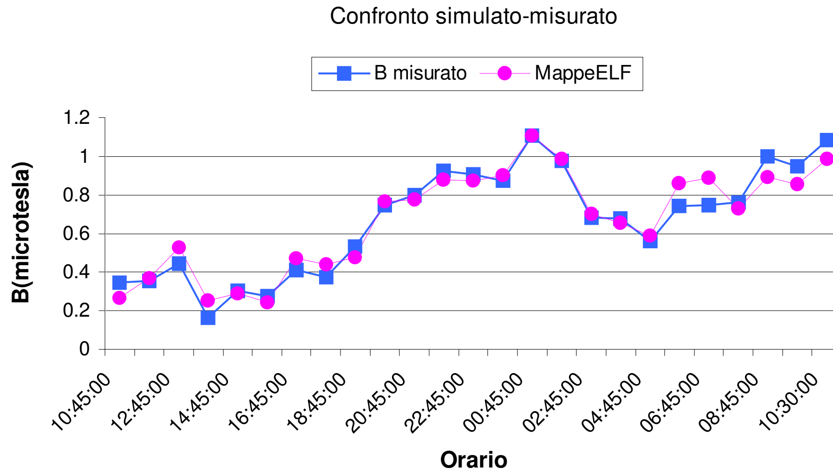


Grafico 7.4- Confronto induzione magnetica simulata e misurata

Come si evince da una prima osservazione del grafico i due andamenti non sono perfettamente corrispondenti. La ragione di ciò risiede nel fatto che per effettuare la simulazione sono state fatte delle approssimazioni. In primo luogo bisogna precisare che si sta trattando con misure puntuali eseguite all'interno di un appartamento. Ciò ha comportato, ai fini della simulazione, una stima approssimata delle distanze dagli assi della linea a cui effettuare le simulazioni. Essendo a conoscenza della posizione dello stabile e dell'appartamento, le simulazioni sono state eseguite considerando x=83 m, y=23 m, z=4 m, avendo posto l'origine del sistema di riferimento al centro del primo traliccio costituente la campata. Un'ulteriore approssimazione che è stata effettuata riguarda l'andamento del terreno che è stato considerato pianeggiante. Bisogna anche precisare che i valori di corrente forniti da Enel sono stati valutati sulle 24 ore in intervalli di 15 minuti, le misure sono invece state effettuate in intervalli di 5 minuti. Naturalmente è da valutare una probabile fluttuazione della corrente stessa. Pertanto è deducibile che la discordanza tra i valori misurati e quelli simulati dipende anche dalla possibile diversità delle

correnti di valutazione. Ovviamente tali approssimazioni hanno reso le simulazioni non perfettamente coincidenti con i valori misurati.
Nel grafico 7.5 si è scelto di mostrare come istogramma a barre i valori di induzione magnetica misurati e simulati, al fine di evidenziare visivamente le differenze tra le due valutazioni.

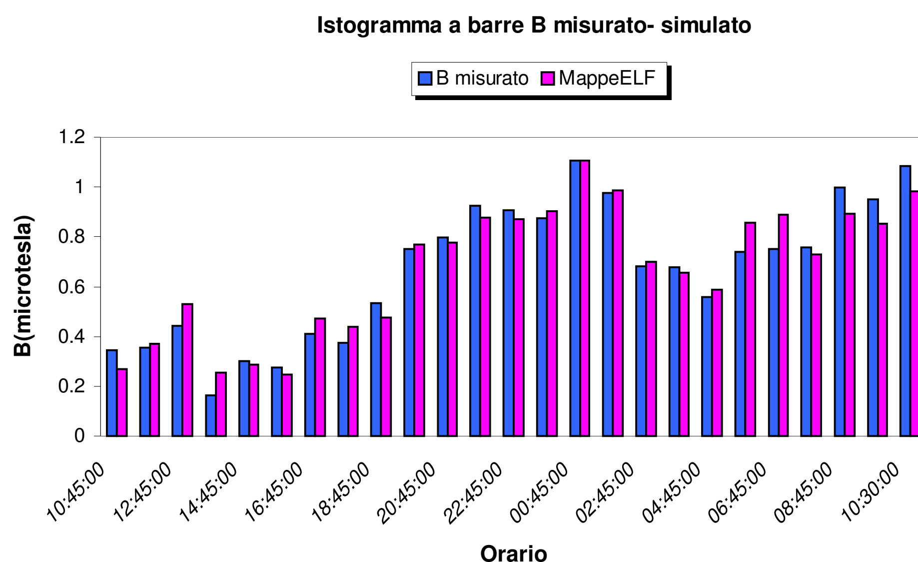


Grafico 7.5- Istogramma a barre d'induzione magnetica simulati-misurati

Si osserva una variazione minima, tra simulato e misurato, di 0.002 μT nel punto corrispondente alle ore 00.45 ed una variazione massima di 140 μT alle ore 6.45.
Nel grafico 7.6 vengono mostrati gli andamenti delle stime di induzione magnetica con le barre di errore standard.
È stata inoltre verificata la correlazione fra i dati di induzione magnetica (misurati e simulati) e i dati di corrente; il valore del coefficiente di correlazione è risultato pari a 0.972 per i dati misurati e 0.999 per quelli simulati.

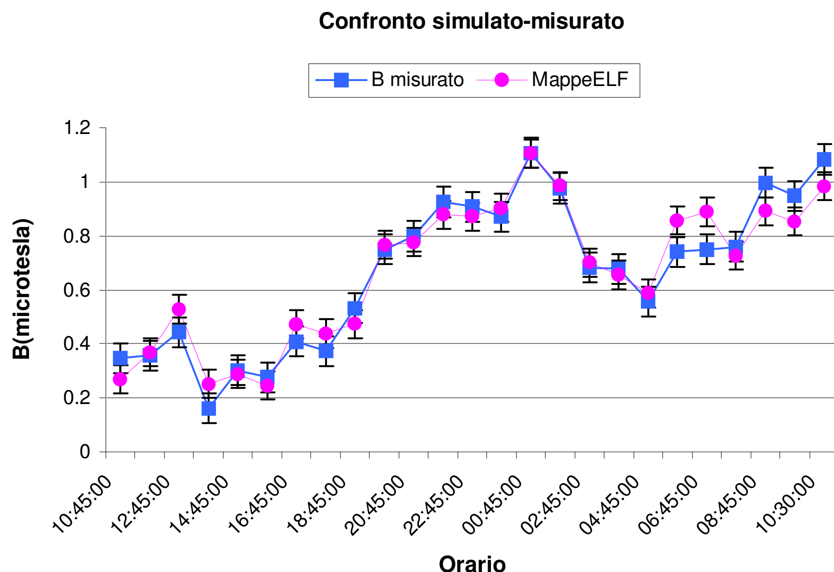


Grafico 7.6- Andamento valori simulati-stimati con barre di errore standard

In sintesi si può affermare che anche nel caso reale esaminato le simulazioni effettuate con MappeElf risultano in buon accordo con i valori misurati, provando in tal modo l'affidabilità del modello nell'applicazione realistica dello stesso.

7.2 Il trasformatore

In aggiunta al lavoro eseguito in questo elaborato si è tentato di modellizzare una cabina di trasformazione MT/BT, con il solo EFC400. Come è noto la struttura di una cabina è ben più complessa di quella di una linea elettrica. Il programma suddivide innanzi tutto l'impianto in 4 diversi gruppi logici:

1. distribuzione in bassa tensione
2. collegamento in bassa tensione al trasformatore
3. modello di trasformatore
4. apparato di alta tensione del trasformatore

Il lavoro più complesso consiste nel costruire i diversi gruppi. La costruzione non è necessaria se il gruppo considerato è presente in libreria. Il programma richiede un numero elevato di parametri da controllare per effettuare la modellizzazione. Tali dati devono essere forniti naturalmente dall'ente elettrofornitore. Inoltre le caratteristiche

della geometria di ogni singolo elemento devono essere inseriti nel programma con elevatissima precisione. In realtà i dati in possesso nella fase di elaborazione sono risultati non sufficienti ad effettuare la simulazione di una cabina nella sua interezza. A questo punto è stato scelto di riprodurre l'elemento della cabina di cui si possedevano il maggior numero di informazioni, ossia il trasformatore.
L'elemento utilizzato in questa simulazione ha le seguenti caratteristiche:

- potenza nominale 1000 kVA
- frequenza nominale 50 Hz
- numero di fasi :3
- tensione di corto circuito : 6%
- tensione nominale lato AT: 20000 V
- tensione nominale BT: 400 V
- connessione triangolo-stella
- trasformatore in resina

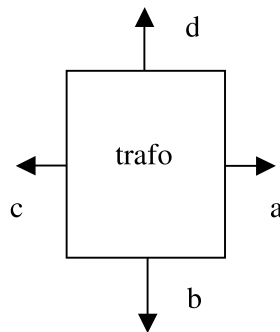


Figura 7.3- Direzioni di valutazione per le simulazioni del trasformatore

Si era in possesso di una serie di misure di induzione magnetica generata dal trasformatore in esame.
Non essendo però a conoscenza delle caratteristiche della struttura geometrica del trasformatore, come ad esempio l'altezza delle candele di bassa e alta tensione o il numero di spire delle bobine, si è utilizzato un modello presente in libreria e si sono tentati degli adattamenti alla

geometria esistente. Le simulazioni sono state eseguite considerando le quattro direzioni mostrate in figura 7.3, ottenendo i risultati mostrati nei grafici 7.5, 7.6, 7.7, 7.8.

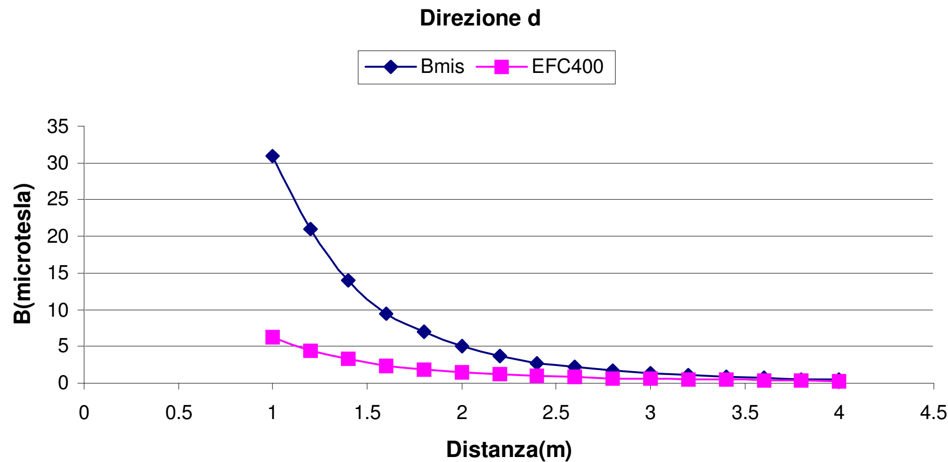


Grafico 7.5- andamento dell'induzione magnetica lungo la direzione d della figura 7.2

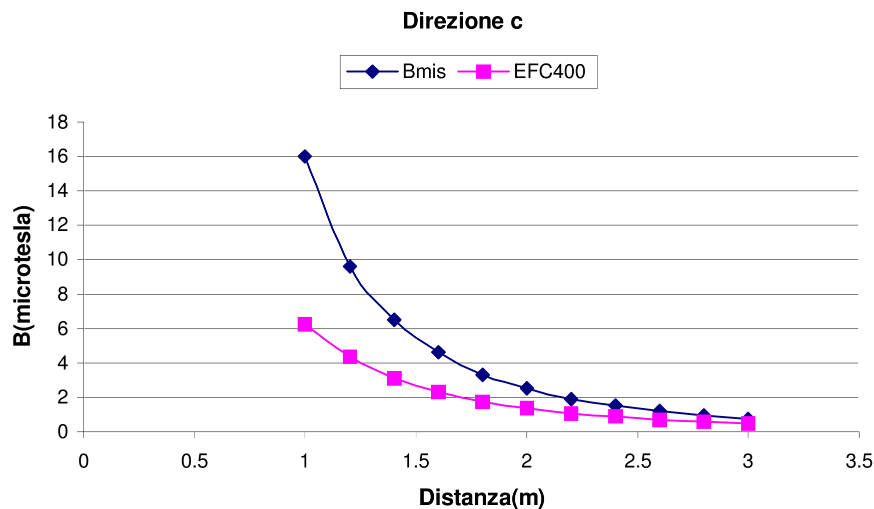


Grafico 7.6- Andamento dell'induzione magnetica lungo la direzione c della figura 7.2

Tutte le simulazioni sono state eseguite ad un'altezza pari a z=0.9 m. Risulta evidente che le approssimazioni introdotte influiscono notevolmente sui valori di campo simulati nelle immediate vicinanze del trasformatore.

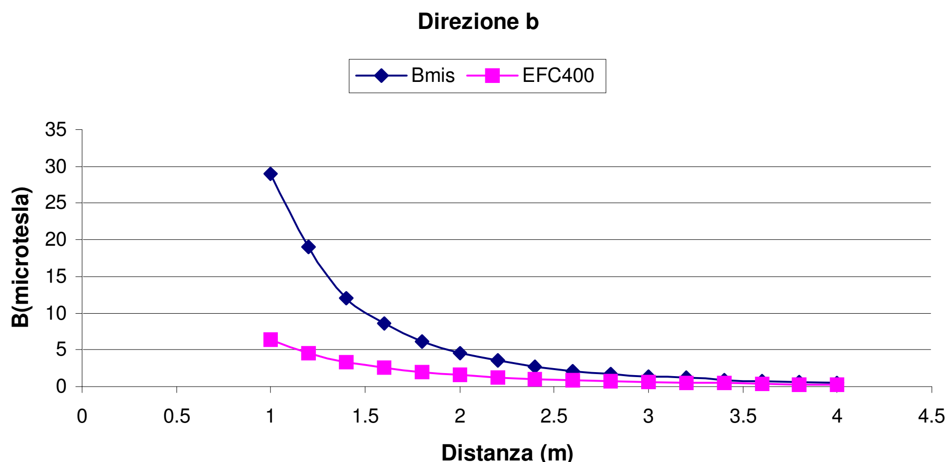


Grafico 7.7- Andamento dell'induzione magnetica lungo la direzione b della figura 7.2

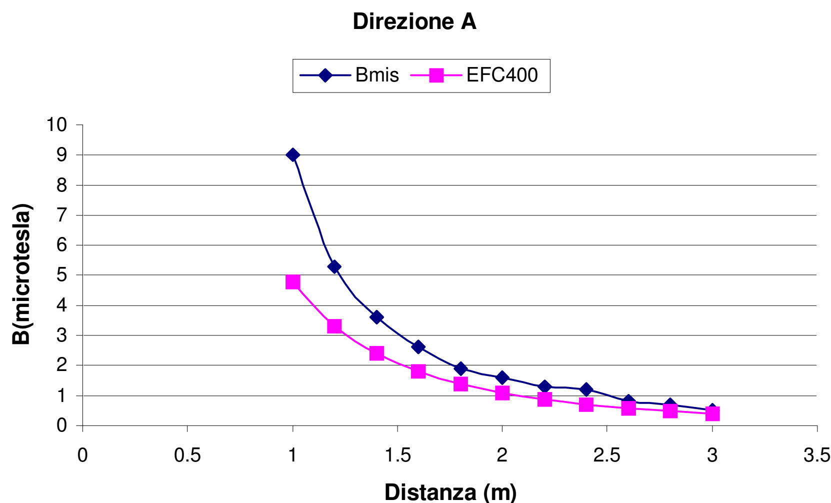


Grafico 7.8- Andamento dell'induzione magnetica lungo la direzione a della figura 7.2

Come si può notare anche per le direzioni a e b i valori simulati sono in disaccordo con quelli misurati se ci poniamo immediatamente vicini al trasformatore.

Tutto ciò mette in evidenza l'estrema sensibilità del programma alla precisione con cui vengono forniti i dati in input. Inoltre è da precisare che il software è di origine tedesca ed utilizza in libreria elementi di fabbricazione tedesca. È inoltre da precisare che per l'uso relativamente alle cabine di trasformazione è ancora in atto la procedura di validazione di EFC400.

In fine si può concludere che, allontanandosi dalla struttura, la sorgente di campo magnetico è costituita dall' insieme dei vari

elementi, quindi risulta meno influente la precisione della conoscenza delle caratteristiche geometriche degli elementi stessi, che vengono visti nel complesso come un'unica sorgente di campo. In questo caso, come si può notare dall'analisi dei grafici precedentemente mostrati, i valori simulati risultano in accordo con quelli misurati.

Conclusioni

L'applicazione di modelli previsionali è di grande utilità per gli studi di impatto ambientale. In fase di pianificazione tali modelli possono rappresentare uno strumento fondamentale al fine di produrre informazioni di base sullo stato dell'ambiente. Essi permettono altresì di progettare interventi di risanamento per gli impianti elettrici esistenti che producono livelli inaccettabili di esposizione. È da precisare inoltre che per i progetti e i controlli degli elettrodotti è indispensabile e fondamentale l'utilizzo di tali modelli, in quanto consentono di stimare la distribuzione spaziale estesa dei valori di campo per situazioni in essere e forniscono la possibilità di effettuare valutazioni previsionali.

Il problema della valutazione dei campi prodotti da linee elettriche è concettualmente semplice, vi sono però diverse complicazioni legate alla natura tridimensionale del problema e alle caratteristiche di variabilità del carico. La complessità del problema aumenta notevolmente se si vuole tenere conto anche delle possibili soluzioni atte a mitigare l'entità dei campi prodotti dal sistema elettrico.

Il lavoro che è stato eseguito durante il periodo dello sviluppo di questo elaborato è stato quello di confrontare due software previsionali per il calcolo dell'induzione magnetica generata da elettrodotti, EFC400 e Mappe_ELF. I software sono stati confrontati in termini di applicabilità alle tipologie e alle configurazioni considerate, accuratezza dei valori calcolati, dati in ingresso e tempi necessari per effettuare le simulazioni, compatibilità dei formati di output con i data base georeferenziati.

Alla luce dei risultati ottenuti in questo elaborato con lo studio delle configurazioni tipiche di linee aeree e di cavi interrati, nonché il caso reale della linea aerea di cui al capitolo 7, si può affermare che i due modelli di simulazione consentono di modellizzare le linee elettriche nelle loro reali condizioni di esercizio, avendo presenti gli effetti della

catenaria, le dimensioni finite dei conduttori e la loro disposizione nello spazio.
EFC400 è un modello versatile, dotato della possibilità di simulare con notevole precisione le distribuzioni di induzione magnetica generate dalle più disparate tipologie impiantistiche. Benché vi sia una richiesta in ingresso di un numero elevato di parametri la gestione dei dati di input risulta semplice e immediata, nel caso di linee elettriche aeree e di cavi interrati.
Il programma MappeELF risulta di più agevole gestione ed è in grado di produrre risultati che riproducono quelli ottenuti con EFC400 con elevata precisione. Entrambi i modelli si presentano alla generazione di mappe tematiche, che consentono di rappresentare la distribuzione spaziale dell'induzione magnetica.
Per quanto concerne il confronto eseguito tra i valori simulati e quelli misurati nel caso reale di una linea elettrica a 380 kV, si può affermare che è stato riscontrato un buon accordo tra le due stime di dati. I modelli parametrizzano bene le sorgenti nonostante le approssimazioni operate nella simulazione .
Concludendo si può affermare che i due modelli di calcolo, MappeELF ed EFC400, sono entrambi un valido strumento per svolgere analisi previsionali. Questi modelli permettono di individuare siti sensibili e zone residenziali a rischio dando la possibilità di sviluppare piani di risanamento. Inoltre è possibile valutare l'impatto elettromagnetico di linee elettriche che si estendono anche per centinaia di chilometri nelle quali si alternano configurazioni strutturali diverse.
Nell'ambito del lavoro di tesi è stato poi avviato lo studio dei campi elettromagnetici prodotti dalle cabine elettriche. In questo ambito la prima attività svolta si è posta come obiettivo la modellizzazione del trasformatore, i cui risultati sono riportati nel paragrafo 7.2.

Bibliografia

[1] C. Mencuccini , V. Silvestrini, *Fisica II, elettromagnetismo-ottica,* Liguori Editore- 1995

[2] P. Baraton, B. Hultzer, *Magnetically induced currents in the uman body,* IEC Publication - 1995

[3] N. Faletti, P. Chizzolini, *Trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica,* Bologna, Patron - 1987

[4] G. Conte, *Impianti elettrici 1 , Hoepli 2002*

[5] G. Conte, *Impianti elettrici 2 , Hoepli 2002*

[6] P. Bevitori, *L'inquinamento elettromagnetico,* Napoli, CUEN - 1997

[7] P. Bevitori, *Inquinamento elettromagnetico: campi elettrici e magnetici a frequenza industriale(50-60 Hz), generati da elettrodotti ed apparecchi elettrici. Aspetti tecnici sanitari e normativi,* Rimini, Maggioli-1998

[8] F. Garzia, G. Veca, *L'inquinamento elettromagnetico: fondamenti tecnici e principi normativi,* Roma, Carocci-2002

[9] M. Grandolfo, P. Vecchia, P. Comba, *Linee ad alta tensione: modalità di esposizione e valutazione del rischio sanitario, in Rapporti ISTISAN 89/20,* Roma, Istituto Superiore di Sanità-1997

[10] P. Comba, M. Grandolfo, S. Lagorio, A. Polichetti, P. Vecchia, *Rischio cancerogeno associato a campi magnetici a 50/60 Hz, in rapporti ISTISAN 95/25,* Roma, Istituto Superiore di Sanità-1997

[11] S. Lagorio, P. Comba, I. Iavarone, G.A. Zapponi, *Tumori e malattie neurodegenerative in relazione all'esposizione a campi elettrici e magnetici a 50/60 Hz: rassegna degli studi epidemiologici, in Rapporti ISTISAN 98/31,* Roma, Istituto Superiore di Sanità-1998

[12] L. Ramacci, G. Mingati, *Inquinamenti elettromagnetici. Aspetti sanitari e giuridici,* Napoli, Sistemi Editoriali-2001

[13] L. Bruzzi, *Prevenzione e controllo dell'impatto ambientale,* Bologna, CLUEB-1995

[14] G. Franceschetti, D. Riccio, M.R. Scarfì, B. Sciannimanica, *Esposizione ai campi elettromagnetici-Guida alle norme,* Torino, Bollati Boringhieri-2000

[15] C. Masetti, *Stato della normativa internazionale, europea e nazionale sulla misura di campi elettromagnetici. Atti della giornata di studio AEI. La misura di campi elettromagnetici i vista della caratterizzazione dell'esposizione umana,* Milano, 20 Novembre 2000

[16] IRPA-INIRC: Interim Guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields; Health Physics vol. 58 pp.113-122, Gennaio 1990- tradotto dall'Istituto Superiore di Sanità- Rapporto ISTISAN 90/66- cod.ISSN 0391 – 1675

[17] ICNIRP: Guidelines for limitino exposure to time-varying, magnetic, and electromagnetic fields, da Health Physics Socety-1998

[18] OMS, *Promemoria n.205: Campi elettromagnetici e salute pubblica. Campi a frequenza estremamente bassa.*

[19] OMS, *Promemoria n.263: Campi elettromagnetici e salute pubblica. Campi a frequenza estremamente bassa e cancro.*

[20] OMS, *Promemoria Marzo 2000: Campi elettromagnetici e salute pubblica. Politiche cautelative* (dal sito OMS: www.who.it)

[21] P. Bevitori, S.R. De Donato, *La valutazione dell'inquinamento elettromagnetico,* Rimini, Maggioli-2003

[22] N. Zappetti, D. Andreuccetti, *Modellizzazione dei conduttori di un elettrodotto aereo: la catenaria, in IFAC Tecnical Report N. TR/AEL/08.03,* Firenze, IFAC-CNR 2003

[23] L. Fellini (a cura di), *Elettrodotti e territorio nuove tecnologie per ridurre l'inquinamento elettromagnetico. Giornata di studio,* Padova 22 Novembre 2000, Padova, CLUEP-2000

[24] R Conti, *Riduzione del campo magnetico*, rivista AEI volume 88, Dicembre 2001

[25] R. Conti, *Possibili metodi di riduzione del campo magnetico a frequenza industriale,* negli atti del convegno “Radiofrequenze e frequenze industriali: fonti di inquinamento elettromagnetico nella provincia di Pordenone e nel territorio del Friuli-Venezia Giulia”, Pordenone, 21-22 marzo 2001

[26] L. Bruzzi (a cura di), *Valutazione di impatto ambientale: guida agli aspetti procedurali, normativi e tecnici,* Rimini, Maggioli 2001

[27] DPCM 8 luglio 2003, *Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50) Hz generata dagli elettrodotti,* G.U. n. 200 del 29-8-2003

[28] L.R. 30, *Norme per la tutela della salute e la salvaguardia dell' ambiente dall'inquinamento elettromagnetico,* 31 ottobre 2000, Regione Emilia Romagna

[29] EFC 400 Manuale utente, by Narda Safety Test Solution, Berlin 2003

[30] A. Poletti (a cura di), *GIS: metodi e strumenti per un nuovo governo della città e del territorio,* Rimini, Maggioli 2001

[31] Manuale di ArcView Gis by ESRI (Enviroment Systems Research Institute) Inc. USA 1996